

THESIS

MUNICH

1965

exp

DIE WIRKUNG DER LUFTTURBINE
AUF DIE PULPA

Fritz Golling



Digitized by the Internet Archive
in 2026

AUS DER KONSERVIERENDEN ABTEILUNG
(Vorstand Professor Dr. Dr. Schug-Kösters)
DER KLINIK FÜR ZAHN-, MUND- UND KIEFERKRANKHEITEN
DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Direktor: Professor Dr. Dr. Josef Heiß

DIE WIRKUNG DER LUFTTURBINE
AUF DIE PULPA

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der Zahnheilkunde
verfaßt und
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Fritz Golling
aus München

München 1964

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Privatdozent Dr. Dr. W. KETTERL
Mitberichterstatter: Professor Dr. Dr. M. SCHUG-KÖSTERS
Dekan: Professor Dr. O. HUG

Tag der mündlichen Prüfung: 1.12.1964

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
I. Entwicklung der zahnärztlichen Bohrgeräte	5-12
II. Wirkungsweise der Turbine im Hinblick auf	13-30
a) Druck	15
b) Vibration	17
c) Temperatur	19
d) Mechanische Traumabildung	25
e) Kühlung	26
f) Ultraschallwirkung	28
III. Literaturübersicht über die histologischen Auswirkungen	31-71
1) des höchsttourigen Bohrens und Schleifens	31-52
2) des hoch- und normaltourigen Bohrens auf die Pulpa und eine vergleichende Auswertung derselben	52-71
IV. Eigene Untersuchungen	71-77
V. Diskussion der	
1) physikalischen Ergebnisse	77-79
2) histologischen Ergebnisse	79-89
VI. Zusammenfassung	89-90
VII. Literaturverzeichnis	95-119

I. ENTWICKLUNG DER ZAHNÄRZTLICHEN BOHRGERÄTE

Eng mit dem Fortschritt in Wissenschaft und Technik in den letzten Jahrzehnten ist auch die Entwicklung des wichtigsten Gerätes des Zahnarztes, nämlich seiner Bohrmaschine, verbunden. Durch den Konkurrenzkampf der einzelnen Firmen der Dentalindustrie vorangetrieben, wurden in den letzten zehn Jahren auf dem Gebiet der zahnärztlichen Bohrgeräte eine solche Fülle von Verbesserungen und Neukonstruktionen auf den Markt gebracht, wie das in allen vorhergehenden Jahrhunderten zusammen nicht der Fall war.

Der Entwicklungsgang der zahnärztlichen Bohrgeräte soll nun im folgenden kurz aufgezeigt werden:

Zum ersten Mal fand die rotierende Bewegung Eingang in die Zahnheilkunde durch den Griechen Archigenes, der einen durch Zeigefinger und Daumen zu drehenden Bohrer - Trepan genannt - zur Eröffnung der Pulpenhöhle verwandte. Trepane wurden ansonsten im Altertum in der Chirurgie für Schädelbohrungen angewandt. Im Mittelalter finden wir dann die Handbohrer neben den Gravierinstrumenten in verstärktem Maße hervortreten. Sie wurden von den Behandlern meist selbst gefertigt und geschärft und waren daher in den verschiedensten Variationen vorhanden (Eichner ⁹) (siehe Abb. 1 S.91).

Bereits im Jahre 1728 wird von Fauchard in seinem Buch "Le chirurgien dentiste ou traité des dents" der Fiedelbogen angegeben. Es handelt sich hier um einen derben Eisenwinkel mit dem über eine Rolle gedrehten Bohrer. Hin- und Herdrehen der Rollachse erfolgte mit einem durch Darmsaite bespannten Bogen (Proskauer und Witt ⁴²). Je nach Länge der Saite und der Stärke des Zuges daran wurden 7 Umdrehungen des Bohrers und mehr erzielt (Eichner ⁹) (siehe Abb. 2 S.91). So machte sich also bereits zu dieser Zeit die Tendenz nach höheren Umdrehungszahlen bemerkbar, um sich dadurch eine Arbeitserleichterung zu verschaffen. Diese Auffassung ist nun richtungsweisend für alle folgenden Konstruktionen von Bohrgeräten. So wurde gegen Ende des 18. Jahrhunderts von Lürer (Paris) der sog. Drillbohrer geschaffen, der bei Zug am Handgriff 2 1/2 Umdrehungen ausführte. Bereits ins 19. Jahrhundert fällt die Konstruktion der Handbohrmaschine von Lautenschläger-Berlin, die von Luckow gebaut wurde. Sie hatte drei Übersetzungen und einen Kreiseidrehgriff, um den Bohrer nur nach einer Richtung drehen zu können (siehe Abb. 3 Seite 92). Durchsetzen konnte sie sich allerdings nicht. Genau so verhielt es sich mit dem Krückenbohrer nach Kestner-Köln (um 1860) (Eichner ⁹).

All diese Geräte brachten keine nennenswerte Erleichterung für den Behandler, da zu ihrer Betätigung beide Hände benötigt wurden, zu einer exakten Präparation aber die eine Hand des Behandlers frei sein mußte.

Erst mit der Konstruktion des sog. "ERADO" durch den Engländer Harrington (1864) wurde dieses Ziel zum ersten Mal erreicht. Es handelte sich bei dieser Konstruktion um eine kleine, elegant ausgestattete Blechdose mit einem Uhrwerk darin, das durch eine Feder aufgezogen wurde und dann den Bohrer ungefähr 2 Minuten drehte (siehe Abb. 4 S. 92). Es war also dasselbe Prinzip, das wir heute bei Spielsachen anwenden. Durch die geringe Kraftreserve der Feder war der ERADO aber ebenfalls nur bedingt brauchbar (Strömgren ⁴⁴). Immerhin aber war die eine Hand des Behandlers frei.

In das Jahr 1868 fiel dann die Erfindung der sog. pneumatischen Bohrmaschine durch den Amerikaner Green, bei welcher der Bohrer mit Hilfe eines Blasebalgs getrieben wurde und im selben Jahr konstruierte Greenwood eine Bohrmaschine aus einem Spinnrad (Proskauer und Witt ⁴²). Erst aber als Elliot das Spinnrad zur ersten Fußtretbohrmaschine umbaute und Morrison das Verhältnis von Schwungrad und Rolle in ein richtiges Verhältnis brachte, so daß bei eifrigem Betätigen des Pedals etwa 2 000 U/min. erzielt wurden, hatte sich der erste wirkliche Erfolg eingestellt (Münch ³⁶) (siehe Abb. 5 S. 93). Das von Morrison 1871 entwickelte Modell wurde von der Firma SS-White verbessert in den Handel gebracht. In Europa wurde dieses Gerät 1873 eingeführt und fand schnelle Verbreitung (Eichner ⁹). Diese Bohrmaschine stellt entwicklungsmäßig die Basis für alle heute gebräuchlichen Bohrmaschinen dar (Strömgren ⁴⁴). Die Tourenzahl war genügend groß, die eine Hand des Behandlers frei und damit die Grundlage für eine exakte Präparation geschaffen.

1874 konstruierte Green zur Vervollkommnung der Fußtretbohrmaschine nach Morrison einen elektrischen Bohrer, den wiederum die Firma SS-White herstellte (Proskauer und Witt ⁴²).

Stürmisch nahm nun die Entwicklung der Bohrgeräte ihren Verlauf. Die erste deutsche elektrische Bohrmaschine mit Akku-Betrieb wurde von der Firma Reini-ger Gebbert & Schall bereits im Jahre 1887 vorgestellt. Die Drehzahl war regulierbar und auch Rechts- und Linkslauf möglich. Sie war außerdem durch die Erfindung des dynamo-elektrischen Prinzips von Werner von Siemens wirtschaftlich und leicht ausgeführt (Eichner ⁹).

Die erste deutsche elektrische Bohrmaschine mit Anschluß an das Lichtnetz wurde dann im Jahre 1891 wiederum von derselben Firma gebaut und war bereits mit Leuchstab und Thermo-Kauter ausgerüstet (siehe Abb. 6 S. 93). Auch eine Bohrmaschine mit Wasserantrieb wurde ausprobiert, aber der elektrische Antrieb setzte sich durch. Um nun die Zahnhöhle vollkommen von der Karies befreien zu können, mußte man von verschiedenen Richtungen her das Handstück ansetzen können; so entstand das Winkelstück (Proskauer und Witt ⁴²) (siehe Abb. 7 S. 94).

Die elektrische Bohrmaschine fand dann in den folgenden Jahrzehnten ständig technische Verbesserungen: 1897 wurde der Trommelanker und Fußschalter eingeführt, weiter eine Verbesserung der Aufhängung und dadurch leichtere Handhabung des Gerätes erzielt. 1907 wurde der Bohrschlauch durch das Schnurrollengetriebe (Doriotgestänge) ersetzt, wodurch höhere Drehzahlen möglich wurden (Eichner⁹). Für die erste elektrische Bohrmaschine wurde dann die Umdrehungszahl der Morrison'schen Fußtretbohrmaschine (2 000 U/min. Maximum) übernommen und über zwanzig Jahre beibehalten. Nach fast drei Jahrzehnten setzte sich - durch die Huet'schen Versuche und die systematischen Beobachtungen Drendels gefördert - die Erkenntnis durch, daß eine Steigerung der Umlaufgeschwindigkeit beim Schleifen von Vorteil sein könne. So wurde dann 1920 empfohlen für den Stahlbohrer die bisherige Umdrehungszahl von 1 000 U/min. beizubehalten, für die Diamantschleifer aber - die schon zu dieser Zeit von Schröder in Form von diamantierten Kupferkegeln und Kupferwalzen entwickelt wurden - die Drehzahl auf 4 000 U/min. heraufzusetzen. Es begann sich also der Grundsatz "schnell schleifen, langsam bohren" durchzusetzen. So erweiterte also die Dentalindustrie bei unseren Bohrgeräten die U/min. auf 4 000 (Münch³⁶). Drendel und Zweiling (1932) gelang es dann, eine weitgehende Verbesserung der Diamantschleif-Instrumente zu erzielen, indem sie in einem besonderen Verfahren die Diamantsplitter so gleichmäßig und fest im Trägermetall verankern konnten, daß damit eine zweckmäßige Bearbeitung der harten Zahnschubstanz möglich wurde (Schwarzkopf H. und Fischer H.⁵¹). Nach Vervollkommen der Diamantschleifer zu unseren heutigen Präzisionsschleifkörpern wurde dann nochmals eine Steigerung der U/min. in unseren Motoren auf 6 000 durch Einführung des sog. Schnellganges durchgeführt. Dieser Drehzahlbereich war in den Jahren nach 1945 in der Praxis Allgemeingut geworden und wurde auch von der Mehrzahl der praktizierenden Zahnärzte Europas und Amerikas bis in das Jahr 1956 hinein anerkannt und beibehalten (Münch³⁶). Doch auch weiterhin versuchte man die Drehzahlen zu steigern, Druck und Vibration zu vermindern. Dies gelang glänzend durch Einführung des hochtourigen Bohrens in Kombination mit dem von Drendel und Zweiling 1951 entwickelten Imperatorsystem. Durch die absolut starre Führung des Schleifschafes werden Schlagbewegungen während der Präparation im Munde kaum mehr erzeugt (Schwarzkopf H. und Fischer H.⁵¹). Die Tourenzahl andererseits zu erhöhen, boten sich bei den maschinengetriebenen Geräten drei Möglichkeiten:

- 1) Ausschaltung bestimmter Widerstände am Motor, wobei sich die U/min. bis um 70 % steigern läßt; dabei ist aber zu beachten, daß die Leistung des Motors noch genügend groß bleibt.
- 2) Anbringung von Übersetzungen am Doriotgestänge.
- 3) Anbringung von Übersetzungen im Hand- oder Winkelstück selbst (Bonsack³).

Die erste Möglichkeit ist heute zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Alle heute fabrikmäßig gelieferten Bohrgeräte sind mit einem höbertourigen Motor ausgerüstet, als dies in den Jahren von 1945-55 der Fall war.

Anhand von Fabrikaten einiger bekannter Firmen soll dies veranschaulicht werden:

a) Firma Ritter AG Karlsruhe:

	<u>Normalgang:</u>	<u>Schnellgang:</u>
1. Stufe	700 U/min.	850 U/min.
2. Stufe	1 650 "	2 050 "
3. Stufe	3 100 "	6 000 "
4. Stufe	5 000 "	10 000 "

Diese Angaben gelten für die heute mit 1 000 Ohm Widerstand ausgerüsteten Motoren.

b) Firma Kaltenbach & Voigt, Biberach/Riß:

a) Normalgang 1 000 bis 6 000 U/min.

b) Schnellgang 2 000 bis 12 000 U/min. (Eichner⁸⁾)

Die zweite Möglichkeit, die Tourenzahl zu steigern, ist die Anbringung von Übersetzungen an Bohrmaschinen, die mit dem Poriotgestänge ausgestattet sind. Diese erhöhen die von der Achse des Motors gelieferte Drehzahl um das Drei- bis Vierfache. Entscheidend hierbei ist, daß die Endgeschwindigkeit erst am Handstück erzeugt wird; das bedeutet, daß weder der Motor noch das Schnurrollenlager größerem Verschleiß ausgesetzt sind.

Die bekanntesten davon sind:

a) KAVO - Schnellauf-Gelenk-Gleitverbindung 419

(Kaltenbach & Voigt)

Übersetzung: 1 : 1, 1, 1 : 3

Das Schnellauf-Gelenk hat zwei Schnurrollen mit verschiedenem Durchmesser. Das Einstellen des oberen Drehzahlbereiches erfolgt durch Umlegen der Bohrmaschinenschnur auf die kleinere Rolle. Eine Reibgummiübertragung legt den Antrieb bei Ausüben großen Druckes oder Verkleinern von Instrumenten still.

b) DUO-SPEED-Transmission (Drendel & Zweiling)

Übersetzung: 1 : 0,8, 1 : 3,3

Die Übertragung erfolgt durch gummibelegte Kegelräder. Das Einstellen des gewünschten Übersetzungsverhältnisses geschieht durch Verschieben der Kegelradeinstellung durch einen Druckstift, der in seinen zwei Stellungen arretiert werden kann.

- c) MICRO-MEGA-Gleitverbindung (Garnier & Fils, Besancon)
Übersetzung: ungefähr 1 : 3

Weitere Übersetzungen werden geliefert von den Firmen;

- 1.) Kaltenbach & Voigt;

KAVO 420

Ankerdrehzahl wird hier nur 20 - 50 % erhöht, um bei Bohrmaschinen mit schnellem Ankerumlauf eine Rotationssteigerung zu vermeiden, welcher unsere normalen Hand- und Winkelstücke noch nicht gewachsen sind,

- 2.) A. Henninger, Karlsruhe;

AHK - Schnellübersetzung

Übersetzung: 1 : 3,5

Umschalten der Gänge erfolgt durch leichten Druck auf die Schnur während des Laufes.

- 3.) Densco Incorporated Denver Colorado

liefert eine Zwischenrollenvorrichtung, die unmittelbar an die Motorrolle angeschlossen ist und die Geschwindigkeit verdoppelt.

- 4.) Midwest Dental-Manufacturing Comp., Chicago

brachte zwei verschiedene Arten von Übersetzungen heraus. Die eine ist am Motor selbst angebracht, die andere im Doriotgestänge (Ontrup ³⁹).

Da nun die normalen Hand- und Winkelstücke der Beanspruchung durch die hohen Drehzahlen (30 - 40 000) bei Verwendung einer Bohrmaschine und Gleitverbindung nicht mehr standhielten, wurden hierfür eigens die sog. Supra-Hand- und Winkelstücke geschaffen, die eine enge Lagerung der Handstückachse aufweisen und mit rostfreiem Spezialkugellager ausgerüstet sind (Münch ³⁷ und Ontrup ³⁹). KAVO hat Hand- und Winkelstücke mit einem Kugel- und Saphirlager ausgestattet, Chayes verwendet leicht ersetzbare Glaslager, Micro-Mega Hartmetall-Gleitlager (Meyer ³²). Diese Handstücke sichern einen ruhigen Lauf und stark verminderte Reibungswärme, trotzdem können sie die Qualität des Imperatorsystems, das wie oben angegeben, ebenfalls für hohe Touren zu verwenden ist, nicht erreichen (Ontrup ³⁹).

Die dritte Möglichkeit, die Tourenzahl zu erhöhen, war der Einbau von Übersetzungen in Hand- und Winkelstücke selbst. Diese bestehen aus einem System von kugellagerten Rollen, über die ein oder zwei Nylonriemen laufen. Aus konstruktionstechnischen Gründen handelt es sich bei all diesen "Hand- und Winkelstücken" nur um Winkelstücke.

Die bekanntesten davon sind;

1.) D & Z-Winkelstück RT 150 (Drendel & Zweiling)

Übersetzung 1 : 6

Es wird wie jedes normale Hand- und Winkelstück am Doriotgestänge befestigt, eine zusätzliche Benützung einer Schnellaufübersetzung ist deshalb möglich.

Ebenso verhält es sich mit dem

2.) Page-Chayes-Handstück (Page Chayes-Dental-Instrument-Comp. New-York)

Übersetzung 1 : 5

3.) Micro-Mega-Übersetzungshandstück, Modell 70 (Garnier & Fils, Besancon)

Übersetzung: ungefähr 1 : 5

4.) Im Gegensatz dazu wird das Kerr-Übersetzungshandstück (Firma Kerr, USA) direkt am Ende des Doriot-Armes ohne Zwischenschaltung einer Gelenkgleitverbindung angeschlossen.

Übersetzung: 1 : 5 (Ontrup 39, Münch 37)

Diese drei Möglichkeiten also - Erhöhung der Tourenzahl am Motor selbst, Anbringung von Gelenk-Gleitverbindungen am Doriotgestänge und Übersetzung im Handstück selbst - bieten sich uns heute bei den maschinengetriebenen Instrumenten an, die Drehzahlen beachtlich zu steigern, um bei Kombination aller drei Möglichkeiten Tourenzahlen bis zu 150 000 und mehr zu erreichen.

Diesen maschinengetriebenen Geräten stehen die wasser- und luftgetriebenen, die Turbinen, gegenüber.

Im Jahre 1928 wurde zum ersten Mal in den Kopf eines zahnrätlichen Winkelstückes eine Wasserturbine eingesetzt, da man zu dieser Zeit noch glaubte, daß nur mit Wasser die nötige Durchzugskraft zu erreichen wäre. Dieses Wasserturbinen-Handstück wurde vom National Bureau of Standards in Zusammenarbeit mit der American Dental Association geschaffen. Eine technische Weiterentwicklung stellt das von Nelsen 1953 entwickelte hydraulische Turbinenhandstück - "TURBO JET" - dar. Es erreicht bei 9 atm Wasserdruck, erzeugt von einer kleinen Pumpe, Drehzahlen bis zu 60 000. Die University of Michigan, School of Dentistry, benutzte auf Anregung von Peyton und Henry Luft als Treibmittel und schuf so die Luftturbine. Vier verschiedene Luftturbinen für zahnrätliche Zwecke sind heute in den USA im Handel:

1.) Der BORDEN-AIROTOR, der in Zusammenarbeit des Zahnarztes Dr. Borden mit der Firma SS-White hergestellt wurde und auch das führende Fabrikat ist,

2.) Die WEBER-TURBINE, die am ehesten dem Original entspricht,

3.) Die MIDWEST-AIRDRIVE 400,

4.) Der Densco Air-Turbec (Schepers ⁵⁰).

In Deutschland wird die Produktion des BORDEN-AIROTOR-Handstücks in Lizenz von der Firma Kaltenbach & Voigt hergestellt, auch die Ritter- und Emda-Geräte werden mit diesem Fabrikat ausgerüstet.

Der Borden-Airotor besteht aus dem Turbinenhandstück, das aus konstruktionstechnischen Gründen als Winkelstück hergestellt wird, in dessen Kopf eine Turbine eingebaut ist, in die der Bohrer oder Schleifkörper durch eine Kunststoffhülse eingeklemmt wird. Die zum Antrieb erforderliche Luftmenge, die vom Kompressor geliefert wird, beträgt 30 Ltr/min. Luft und Wasser werden in einem leicht beweglichen Schlauch an das Winkelstück geführt. Ein Mikronebelöler setzt der strömenden Luft soviel Öl zu, wie zur einwandfreien Schmierung der Turbinenkugellager notwendig ist. Das zur Kühlung der Präparationsstelle vorgesehene Luftwassergemisch wird durch Düsen aus dem Winkelkopf abgegeben. Hinzu kommt noch der Mischventilbehälter und der Doppelschalter zur Fußbedienung (Schwarzkopf und Fischer ⁵¹).

Nur die Firma Siemens (Erlangen) stellt in Deutschland eine eigene Entwicklung her. Diese weist gegenüber dem Borden-Airotor keine grundlegenden Unterschiede auf. Nur der Bohrer steckt in einem Spannfutter aus Metall und ungefähr 70 % der Antriebsluft werden wieder rückgeführt, wodurch die Turbine geräuschloser läuft. Bereits 1937 wurden im Siemens-Versuchslabor/Erlangen unter Professor Gerdin Versuche unternommen, Handstücke mit Luft zu treiben, scheiterten aber an Materialfragen (Schepers ⁵⁰). Mit diesen Geräten nun können die phantastischen Drehzahlen von 400 000 U/min. erreicht werden, je nach Umfang des Bohrerkopfes oder Schleifschaftes.

Auf dem Gebiet der luftgetriebenen Geräte bleibt nur noch das von dem schwedischen Zahnarzt Dr. Norlen entwickelte Dentalair-Gerät zu nennen, das von der Firma Atlas Copco (Essen) gebaut wird. Bei diesem Gerät werden die ursprünglich erzeugten 120 000 U/min. durch ein Kugelgetriebe auf 50 000 U/min. reduziert. Bewußt verzichtet man hier auf höchste Tourenzahlen zu Gunsten besserer Durchzugskraft und Wegfall des vibrierenden Schnurantriebs (Münch ³⁷).

Für all diese hoch- und höchsttourigen Geräte mußte ein neuer Bohrer entwickelt werden, da die Stahlbohrer bei den hier entstehenden hohen Temperaturen zu schnell abgenutzt wurden. Es entstand der WOLFRAM-CARBID-Hartmetallbohrer. Mit ihm wurde der Grundsatz "schnell schleifen, langsam bohren" zum ersten Mal durchbrochen (Münch ³⁶).

Wurden bei den bisher erwähnten Geräten Zahnschmelzen mit Rotationsinstrumenten entfernt, so machten nach dem Krieg in den USA zwei gänzlich neue Methoden von sich reden; Sandstrahlgebläse und Ultraschallbohrer. Ersteres wurde von

R. R. Black in Zusammenarbeit mit der Firma SS-White entwickelt und als AIRDENT-Gerät (1951) in den Handel gebracht. Der Präparationsvorgang bestand darin, daß Aluminiumoxydteilchen von einem Kohlendioxidstrom mit 5,3 Atm. gegen den Zahn getrieben wurden. Es konnte sich aber wegen verschiedener Mängel (kariöse Massen werden nicht angegriffen, Cofferdam muß gelegt werden, Verstaubung der Praxis) nicht durchsetzen.

Ebenso erging es dem Ultraschallbohren. Hier wird der Zahn mit Hilfe eines durch Ultraschall betriebenen Stößels, der 28 - 30 000 mal in der Sek. vibriert, abgetragen. Ein Schleifprozeß entsteht, indem ein Gemisch von Aluminiumoxyd und Wasser durch eine feine Duse zwischen Zahn und Stößel gespritzt wird. Ein brauchbares Gerät wurde von der Cavitron-Gesellschaft 1953 in den USA als CAVITRON-Gerät in den Handel gebracht. Auch hier waren gewisse Mängel vorhanden (unübersichtliches Arbeitsfeld, schnelle Abnutzung der Stößel, zeitraubendes Auswechseln derselben usw.). Diese beiden Präparationsarten sind jedenfalls heute als überholt und der Vergangenheit zugehörig zu betrachten (Morrant und Stephens 33).

Gegenwärtig jedoch zeichnet sich ein ganz neuer Weg in der Entwicklung unserer Bohrgeräte ab, wie das auf der Dentialschau in Köln 1962 und beim Kongreß der American Dental Association in Miami 1962 zum Ausdruck kam: Der LUFTMOTOR.

Der von der Firma KaVo entwickelte DENTATUS-LUFTMOTOR gibt stufenlose Geschwindigkeiten bis zu 30 000 U/min. her, die mit einigen der Intra-Instrumenten-Aufsätze auf 60 000 U/min. übersetzt werden können. Die amerikanischen Firmen SS-White und Midwest haben ähnliche Konstruktionen für den Bereich bis zu 25 000 U/min. entwickelt. Diese Motoren sitzen direkt im oder am Hand- und Winkelstück. Genauere Daten über diesen Motor waren bei Abfassung dieses Kapitels (April 1963) noch nicht zu erfahren. Bei diesen Ausstellungen wurde auch der neue Slogan geprägt: "Low speed-high torque." Manchem Praktiker, der sich mit dem fast drucklosen Bohren bei Turbinen nicht zurechtfinden konnte, wird dies nur recht sein (Eichner 10).

Welche Richtung der zahnärztlichen Bohrgeräte sich letzten Endes durchsetzen wird, die maschinengetriebenen, die Turbinen oder vielleicht eine ganz neue Art, wie etwa die oben erwähnten Luftmotoren, bleibt abzuwarten. Alles ist hier noch im Fluß begriffen. Eines jedoch ist vollkommen klar: Man sollte sich niemals einem neuen Gerät sofort und vorbehaltlos zuwenden, wenn die biologische Wirkungsweise dieses Gerätes noch nicht eindeutig geklärt ist. Einen Beitrag zur Klärung der Wirkungsweise der Luftturbine auf die Pulpa zu liefern, soll Aufgabe dieser Arbeit sein.

II. WIRKUNGSWEISE DER TURBINE IM HINBLICK AUF DRUCK, VIBRATION, TEMPERATUR, MECHANISCHE TRAUMABILDUNG, KÜHLUNG UND ULTRASCHALLWIRKUNG

Als Einleitung des ersten Hauptkapitels möchte ich folgenden mahnenden Rat EICHNERS⁹ stellen, den dieser in seinem Referat über wissenschaftliche Untersuchungen zum "Höchsttourigen Bohren" bei der 100-Jahr-Feier der Deutschen Gesellschaft für ZMK in Berlin an die Kollegenschaft erließ:

"Für die schwere zahnärztliche Tätigkeit in der täglichen Praxis ist es sinnvoll, sich jede mögliche Erleichterung zu Nutze zu machen, aber nur unter einer Voraussetzung, nämlich daß man verantwortungsbewußt seinen Patienten und sich selbst gegenüber ist."

Zweifellos bringt die Anwendung der Luftturbine in der zahnärztlichen Praxis für den Behandler eine große Verantwortung, zugleich aber auch eine Erleichterung in der täglichen Arbeit mit sich. Verantwortungsbewußt handeln heißt in diesem Fall, sich über dieses Gerät und seine Anwendung genauestens zu informieren und bei seiner Verwendung äußerste Achtsamkeit walten zu lassen.

Wie steht es aber nun mit dem Fragenkomplex der Erleichterungen? Bedeutet die Anwendung des Airtors in der zahnärztlichen Behandlung tatsächlich eine Erleichterung? Diese Frage ist wohl mit einem eindeutigen "Ja" zu beantworten. Sie bedeutet nämlich sowohl eine Erleichterung für den Behandler durch Verkürzung der Arbeitszeit bei geringerem Kraftaufwand als auch für den Patienten durch Verkürzung der Behandlungszeit und durch Verminderung der Schmerzempfindung.

Frägt man sich nun, welche Ursachen für die Schmerzempfindung verantwortlich gemacht werden können, so illustrieren wohl am augenfälligsten die aus der Arbeit ONTRUPS³⁹ entnommenen schematischen Zeichnungen, daß folgende drei physikalischen Erscheinungen, nämlich Druck, Vibration und Temperatur dafür verantwortlich zu machen sind.

Excavator



Normaltourig



Hochtourig



Höchsttourig



Mechanische Schmerzursachen; schematische Darstellung von Druck, Vibration und Temperatur.

Ihr Einfluß ist in den einzelnen Drehzahlbereichen unterschiedlich zu bewerten. Die Drehzahlbereiche werden nach EICHNER³⁹, dessen Einteilung in Deutschland

heute allgemein anerkannt ist, wie folgt aufgliedert:

Normaltourig	0 - 12 000 U/min.)	Bohrmaschinen
Hochtourig	12 - 40 000 U/min.)	
Höchsttourig	40 000 - 150 000 U/min.)	maschinengetriebene und luft- getriebene Geräte (Ontrup ³⁹)
	150 000 - 400 000 U/min.)	

Bei der Beseitigung kariösen Dentins mit dem Excavator oder auch sehr langsam rotierendem Rosenbohrer lassen sich Schmerzen vor allem auf den angewendeten Druck zurückführen. Bei normalen und hochtourigen Präparationen sind Druck, Vibration und Temperatursteigerung etwa gleichmäßig an der Schmerzverursachung beteiligt. Bei höchsttourigem Arbeiten dagegen muß hauptsächlich mit der Temperatursteigerung als Schmerzsache gerechnet werden (Ontrup ³⁹).

Als weitere Ursachen für die Bohrbeschwerden sind nach KLUCZKA noch anzuführen:

1. Verletzung der Nervenendigungen im Dentin während des Bohrprozesses
2. Kühlung mit zu kalter Luft oder zu kaltem Wasser

NB) Die Innervation des Dentins konnte von Dieck, Tojoda und vor allem von Münch klar nachgewiesen werden. In histologischen Untersuchungsbefunden stellten sie fest, daß intrabuläre Nervfasern (markhaltiger und markloser Art), die in den Dentinkanälchen bis zur Peripherie verlaufen und sich um die Tomes'schen Fasern winden, als nervöse Elemente anzusehen sind (Kluczka ²⁵).

Auch der Ultraschall wird von manchen Autoren beim hochstourigen Bohren für Schmerzauslösung und Schädigung der Pulpa verantwortlich gemacht. Außerdem konnte BRÄNSTRÖM ⁶ (Stockholm) nachweisen, daß sowohl durch einen Luftstrom, der auf freies Dentin trifft, als auch durch Unterdruck von 2-3 mm Hg über der Kavität in sämtlichen Fällen Schmerzen und Veränderungen in der Odontoblastenschicht auftraten (Abflachung der Odontoblastenschicht, Kernaspiration).

Diese physikalischen Erscheinungen üben auf die Pulpa und das Periodontium einen Reiz aus, der über die harte Zahnschubstanz auf beide übertragen wird. Dieser kann bei geringerer Intensität als Druck, Schwingung oder Wärme empfunden werden, bei größerer Intensität jedoch verursacht er immer Schmerzen. Schmerzen sind also die momentane Reaktion dieser Organe auf größere Reizintensitäten; spätere Reaktionen derselben zeigen sich in Form von abgestuften pathologischen Veränderungen, je nach Quantität und Qualität der einwirkenden Noxen. Daß Schmerzen nur bei größerer Reizintensität empfunden werden, entspricht der Verteilung der Schwellenwerte für die verschiedenen Nervenendapparate für Druck, Vibration, Temperatur und Schmerz. Die Pulpa des Zahnes ist nur in der Lage, Schmerz zu rezipieren. Die speziellen Rezeptoren für die Temperatureize liegen in der Mund-

schleimhaut, die für Druck und Vibration ebenfalls in der Mundschleimhaut und im Periodontium (Viohl ⁵²).

Wie verhält es sich nun mit diesen schmerzerzeugenden mechanischen Reizfaktoren bei Anwendung der Luftturbine?

1. Druck

Ganz allgemein wird in der zahnärztlichen Literatur die Kraft, mit der ein in einem Hand- oder Winkelstück rotierender Schleifkörper oder Bohrer gegen den Zahn gedrückt wird, als Druck oder Vorschubkraft bezeichnet und stellt einen schmerzauslösenden Faktor dar. Diese Kraft aber kann nach POLMANN-MOOY ⁴¹ nur bedingt als direkt schmerzauslösender Faktor bezeichnet werden, da eine unmittelbare Relation zwischen Druckanwendung und Schmerzauslösung nur bei einem handgeführten und mit einer Schneidekante versehenen zahnärztlichen Instrument, wie dem Excavator oder dem Schmelzmesser, besteht. Bei einem rotierenden Instrument dagegen müssen die schmerzauslösenden Faktoren als Komponenten der kinetischen Energie aufgefaßt werden, mit der eine Bohrerschneide oder der einzelne Kristall eines Diamantsteines auf die Zahnschubstanz auftrifft und dort eine mechanische Arbeit leistet. Ein nicht rotierendes Instrument wird keinen oder unvergleichlich weniger Schmerz auslösen, wenn es unter gleichen Bedingungen an den Zahn gedrückt wird. Durch Veränderung der Vorschubkraft kann bei rotierenden Instrumenten der Wirkungsgrad der kinetischen Energie und somit die Arbeitsleistung der auftreffenden Schneidekante des Instrumentes variiert werden. Mit steigender Drehzahl kann die Vorschubkraft, um eine gleiche Arbeitsleistung zu erreichen, verringert werden. Bei einem Instrument von 2 mm Ø bei 300 000 U/min. resultiert eine Schnittgeschwindigkeit ($V = U/\min. \cdot 2 \cdot \pi$) von 31,4 m/sec., umgerechnet 113 km/h. Mit dieser Geschwindigkeit trifft nun die Schneidekante oder der Diamantkristall die Zahnschubstanz, so daß bei einer derartig großen kinetischen Energie nicht einmal eine sehr scharfe Schneide nötig ist, um bei geringerer Vorschubkraft einige kleine Partikel vom Schmelz oder Dentin abzusprengen. Die Berührungszeit der einzelnen Schneidekante mit dem Zahn ist bei diesem Vorgang so kurz, daß es auf Grund der Massenträgheit kaum zur Entstehung und Fortpflanzung einer Druckwelle kommt. In diesen beiden Momenten: kleinste Leistung und kürzeste Berührungszeit der einzelnen Schneidekante zum Zahn ist die Ursache der geringen mechanischen Reizbildung, nämlich des Druckes beim Bohren mit turbinengetriebenen Instrumenten zu suchen. Erst eine Summation dieser Vorgänge ergibt hier die große Schleif- und Bohrleistung. Rein praktisch gesehen erlaubt aber auch die Antriebskraft dieser Geräte, der Luftstrom, nur einen Auflagedruck zwischen 20 und 40 gr. Bei Überschreiten dieses Druckes fällt die Drehzahl rasch ab. So hatte nach WALSER ⁵⁴ eine Siemens-Turbine mit einer Leerlaufdrehzahl von 260 000 U/min. bei 123 gr Andruck nur noch eine Drehzahl

von 118 000 U/min. Eine weitere Steigerung des hier kontinuierlich durchgeführten Druckes führte nach wenigen Sekunden zum Stillstand der Turbine. Bei augenblicksweiser tupfender Anwendung des Gerätes waren Drucke von über 200 gr möglich. EICHNER⁹ allerdings konnte an Filmaufnahmen mit einer Ultra-Kamera (6000 - 7000 Bilder/sec) und nachfolgender Zeitdehnung schon bei über 40 gr Auflagedruck ein Stillstehen der zu den Versuchen verwandten KaVo-Luftturbine beobachten.

Wenn man nun als Vergleichsmaß die beim konventionellen Bohren angewandten Drucke von 200 - 2 000 gr u. m. betrachtet, so kann man wohl behaupten, daß das Airotor-Verfahren wie kein zweites zu einem behutsamen Ansatz, der mehr und mehr zu einem leichten Hinwegstreichen und "Pinseln" über die Präparationsfläche hin wird, erzieht. Man sagt daher gewiß nicht zu Unrecht, daß man den routinisierten Turbinenbenutzer an dem gleichbleibenden, hochliegenden Pfeifton der Turbine schon auf einige Entfernung erkennt.

WALSER⁵⁴ bringt auch den Auflagedruck in engsten Zusammenhang mit der Ausbeuteleistung. Als wichtigste Ergebnisse seiner Untersuchungen über den Auflagedruck beim Airotor-Verfahren sind folgende zu werten:

Die oben erwähnte Siemens-Turbine erzielte bei Drucken zwischen 20 - 110 gr bei einer durchschnittlichen Umdrehungszahl von 194 000 U/min. gegenüber einem herkömmlichen Instrument mit 30 000 U/min. unter Verwendung des gleichen Diamantschleifkörpers von 1,5 mm Ø eine Mehrleistung von 203,9 %. Um nun die gleiche Leistung wie ein turbinengetriebenes Instrument zu erreichen, muß wie schon oben erwähnt, bei gebräuchlichen Drehzahlen bis 30 000 U/min. ein wesentlich höherer Druck angewandt werden. Das bedeutet, daß bei 30 000 U/min. der Andruck im Durchschnitt um 214,5 % gesteigert werden mußte, wenn die gleiche Schleifausbeute wie mit der Dental-Turbine erreicht werden sollte.

Zusammenfassung:

Trotz geringster Druckanwendung werden beim Airotor-Verfahren größte Leistungen erzielt. Die Ursachen für den minimalen Druck liegen, rein theoretisch gesehen, nach POLMANN-MOQY in der kleinsten Leistung und der kürzesten Berührungszeit der einzelnen Schneidkanten begründet, praktisch aber auch in dem geringen Auflagedruck, der durch die Antriebskraft der Turbine gestattet wird. Erst die Summation der einzelnen Vorgänge ergibt die große Leistung.

Der Auflagedruck, der sich bei rotierenden Instrumenten über die kinetische Energie schmerzzerzeugend auswirkt, spielt also beim Airotor-Verfahren als mechanischer Reizfaktor und damit als Schmerzsache fast überhaupt keine Rolle.

Die Luftturbine erweist sich also hier als äußerst vorteilhaft.

2. Vibration

Die Vibrationsreize werden durch den stets minimal exzentrischen Lauf der Hand- und Winkelstücke, die Drehzahl, die Anzahl der Bohrerschneiden oder die hervorragenden Diamantkristalle bei Schleifkörpern verursacht (Andreae, Rohrbach, Eichner⁵²). Beim Bohren und Schleifen werden die Schwingungen der Instrumente auf den Zahn übertragen, der seinerseits infolge seiner Steife die Reize auf das Periodontium und die darin liegenden Mechanorezeptoren unverändert überträgt. Es ist noch nicht eindeutig geklärt, ob Druck und Vibrationsreize von getrennten spezifischen Rezeptoren aufgenommen werden oder der Vibrationssinn eine spezielle Leistung des Drucksinnes ist. Als Rezeptoren für Druck und Vibrationsreize werden histologisch und physiologisch die Meißner'schen, die Vater-Pacini'schen und die Meckel'schen Körperchen angesehen (Viohl⁵²).

Das Vibrieren des Zahnes wird nach VIOHL⁵² bei niedrigen Frequenzen als Klopfen, bei höheren als Kribbeln oder Schwirren empfunden. Ab 250 Hz ist infolge der guten Knochenleitung für die hohen Töne vor dem Eintreten der Vibrationsempfindung bereits ein der Frequenz entsprechender Ton zu hören, der ab etwa 700 Hz unangenehm laut wird. Die Beurteilung höherer Frequenzen ist sehr schwierig, da oberhalb von 700 Hz der Eindruck des Vibrierens wegen der stärker werdenden Adaptation immer undeutlicher wird, wobei natürlich interindividuelle und intraindividuelle Schwankungen zu berücksichtigen sind. VIOHL hält entsprechend dem Hörfeld (20 - 2 000 Hz) auch ein Vibrationsfeld für möglich, begrenzt von der Intensitätsschwelle (gegeben durch diejenige Amplitude, bei der ein Vibrieren gerade spürbar wird) nach unten und der Schmerzschwelle nach oben hin. Eine untere Grenzfrequenz kann wegen des kontinuierlichen Überganges in das Druckempfinden nicht bestimmt werden, die obere Grenzfrequenz ist fließend, wie beim Gehör. Weiter glaubt VIOHL, daß entsprechend dem Verlauf der Intensitätsschwelle zur Bestimmung der oberen Grenzfrequenz größere Kräfte notwendig seien, als durch seine Versuchsanordnung an Wechselkräften (Kraft, mit der der Zahn zur Schwingung angeregt wird) ausgelöst werden könnten. Dies leitet er daraus ab, daß bei seinen eigenen Untersuchungen bis 700 Hz immer ein Reizerfolg zu verzeichnen war, mit einer einzigen Ausnahme. Ebenso hält er den von Walsh und Symmons⁵² gefundenen Mittelwert von 600 Hz für die obere Grenze zu niedrig. Auch hier sei wahrscheinlich ein zu leistungsschwaches Gerät der Grund dafür. Ebenso könnte der von Walser⁵⁴ ermittelte Durchschnittswert von 1 000 Hz aus oben erwähnten Gründen u. U. als eine zu niedrige obere Grenze betrachtet werden.

Beim Bohren und Schleifen sind nun die hierbei auftretenden Schwingwege dafür entscheidend, ob Vibration empfunden wird oder nicht. Erst wenn es gelingt, die Schwingwege beim Bohren und Schleifen so klein zu machen, daß sie unterhalb der Intensitätsschwelle liegen, ist ein Vibrieren nicht mehr zu spüren. Damit wäre

das Problem der Ausschaltung der sich zwar nicht in einem direkten Schmerz äußernden, aber sich doch durch lastiges Klopfen und Schwirren bemerkbarmachenden Vibration, die vom Zahn auf den knöchernen Schädel weitergeleitet wird, gelöst, weil die Reize unterschwellig sind. Da nun, wie aus Untersuchungen von Viohl hervorgeht, die beim Schleifen und Bohren auftretenden Schwingwege mit Zunehmen der Frequenz (erhöhter Tourenzahl) immer kleiner werden und die steigende Tendenz der Schwingwegschwellenkurve (Intensitätsschwellenkurve) wahrscheinlich auch über den von ihm untersuchten Drehzahlenbereich anhielt (1 000 Hz oder 60 000 U/min.), ist es möglich, daß sich beide Kurven bei den Frequenzen, die den Umdrehungszahlen bei höchsttourigem Bohren und Schleifen entsprechen, schneiden. Damit wären die Reize unterschwellig und die Begründung dafür gegeben, daß also bei höheren Drehzahlen die Vibration praktisch ausgeschaltet ist. Neben der Frequenzerhöhung ist natürlich auch die Anwendung von zentrisch laufenden Instrumenten (Imperatorsystem) ein Weg, die Vibration herabzusetzen. Nach Untersuchungen Walsers⁵⁴ konnten Vibrationsempfindungen bis zu einer Frequenz von 1 600 Hz ermittelt werden. Diese Frequenz allerdings konnte nur noch in einem einzigen Fall empfunden werden, und ist als Ausnahmeerscheinung zu betrachten. Die durchschnittlich noch als Vibration empfundene Frequenzstärke betrug 1 000 Hz; in einigen Fällen noch darüber hinaus, so daß Walser⁵⁴ zu dem Schluß kam: zur Ausschaltung des Vibrationsempfindens ist im allgemeinen eine Frequenzstärke von 1 300 Hz, d. s. $1\,300\text{ Hz} \cdot 60\text{ sek.} = 78\,000\text{ U/min.}$ notwendig. Bei seinen Frequenzmessungen zeigte sich, daß in allen Umdrehungsbereichen nie nur eine Schwingungsfrequenz auftrat, sondern immer eine Grundfrequenz mit Oberschwingungen, die ein Vielfaches der Grundfrequenz darstellten. Diese ist für die Vibrationsempfindung am wichtigsten, wenn nicht zufällig eine besonders unangenehme Oberwellenfrequenz vorhanden ist. Die Grundfrequenz entscheidet darüber, ob das betreffende Instrument eine Vibrationsempfindung hervorruft oder nicht. Die Zahl der Frequenz der Oberschwingungen ist dabei im allgemeinen unwesentlich. Die Grundfrequenz wird bei niedrigen Touren von der Schneidenfrequenz, bei höheren von der kombinierten Schneiden-Unwuchtfrequenz, bei höchsten Touren nur von der Unwuchtfrequenz gebildet; diese ist wiederum abhängig vom Maß des Lagerspiels und von der Unwucht der Achse eines Instruments. Die von Dentalturbinen über 200 000 U/min. erzeugte Grundfrequenz mit 2 K Hz lag immer weit unter der Hörgrenze 20 - 25 K Hz. Oberschwingungen allerdings wurden bis 70 K Hz gemessen, aber auch beim hochtourigen Bohren (24 000 U/min.) konnten Oberschwingungen bis 30 K Hz gemessen werden (Walser⁵⁴).

Mit oben aufgeführten Ergebnissen stimmen auch die Untersuchungen Eichners⁹ überein, der das Schwingungsverhalten des gleichen Zahnes (einzeln stehender 3+) sowohl beim Bohren als auch beim Schleifen mit Umdrehungszahlen von 6 000 - 250 000 prüfte. Bei Nenndrehzahlen von 6 000 U/min. unter Anwendung eines Hart-

metall-Bohrers Gr. 5 wurde der Zahn von jeder Schneide pro Umdrehung getroffen (Schneidenfrequenz), bei 15 000 - 40 000 U/min, trafen noch mehrere Schneiden den Zahn (Schneiden-Unwuchtfrequenz), bei höchsten Nenndrehzahlen von 80 000 - 250 000 wird der Zahn nur noch von einer Schneide getroffen (Unwuchtfrequenz). Grundfrequenzen wurden von 720 - 2 500 Hz ermittelt.

Die Schwingwege nahmen entsprechend der steigenden U/min, ab. Sie reichten von 24 μ bei 6 000 U/min, bis zu 3,5 μ bei 250 000 U/min, Nenndrehzahl. Auch die Abhängigkeit des Schwingungsweges von der Lagerung kommt im folgenden klar zum Ausdruck, wenn auch mit einem Diamanten von vornherein günstigere Ergebnisse als mit einem Bohrer zu erwarten sind. So wurde mit einem gelagerten Diamanten 270 bei 6 000 U/min, ein Schwingungsweg von 1 μ als Minimum und mit einem nicht gelagerten Stahlbohrer, Größe 7, 40 μ als Maximum der ganzen Versuchsreihe ermittelt. Messungen von Eigenfrequenzen der Zähne wiesen Werte von 300 - 1 500 Herz auf. Vergrößerung des Schwingungsweges tritt bei Resonanzfrequenzen auf, d. h. wenn Zahn und Instrument dieselbe Frequenz haben.

Zusammenfassung:

Die Vibration ist einerseits von der Intensitätsschwelle, andererseits vom Schwingungsweg abhängig. Letzterer kann durch steigende Frequenzen und exakte Lagerung der Instrumente verringert werden. Bei einer Frequenz von etwa 1 300 Hz oder 78 000 U/min, ist dieser Schwingungsweg so klein, daß er nur noch einen unter-schwelligsten Reiz darstellt, so daß kein Vibrationsempfinden mehr ausgelöst wird. Da nun die Luftturbine Drehzahlen bis zu 300 000 U/min, und mehr aufweist, dazu noch der Bohrer fast vollkommen zentrisch läuft, schneidet dieses Gerät hier so günstig ab, wie kaum ein zweites, d. h. bei Behandlung mit der Luftturbine wird keine Vibration mehr empfunden und damit ist der Patient von dieser zwar nicht direkt schmerzhaften, aber doch äußerst lästigen Erscheinung, die sich in Klopfen und Schwirren bemerkbar macht, befreit.

3. Temperatur

Der Wärmeentwicklung beim Airtor-Verfahren muß eine besondere Bedeutung zugemessen werden, da das Protoplasma der Pulpa bereits bei 45 ° geschädigt wird (TITKEMEYER²⁵), während die thermische Schmerzgrenze eines normalen gesunden Zahnes erst bei 55 ° liegt (Hentschel¹²). Kluczka²⁵ hält bereits eine Schädigung der Pulpa bei 50 °, andere Autoren bei 54 - 55 ° möglich.

Untersuchungen von Hensel und Mann¹⁷ über die Schwellenwerte von Kälte- und Wärmeschmerz am Zahn ergaben folgendes: Bei einer Ausgangstemperatur von 36 ° lag die Schwelle für den Wärmeschmerz an der Schmelz-Dentingrenze bei

47,7 °C. Dabei betrug die Temperatur in der Pulpa 36,6 °C. Eine Temperatur von 56,2 °C an der Schmelz-Dentingrenze und gleichzeitig 39,3 °C in der Pulpa war die Grenze für eine besonders heftige Schmerzempfindung. Umgekehrt fand sich die Schwelle für einen Kalteschmerz bei einer Temperatur von 26,4 °C an der Schmelz-Dentingrenze und einem gleichzeitig in der Pulpa registrierten Wert von 35,8 °C. Besonders intensiv wurde der Kalteschmerz bei einer Temperatur von 18,2 °C an der Schmelz-Dentingrenze, wobei die in der Pulpa gemessene Temperatur 34,3 °C betrug. Demnach wird ein Zahn auf Temperatureize zwischen 26,4 und 47,7 keine unangenehmen Empfindungen zeigen, auch histologisch ohne schwerwiegende Veränderungen bleiben (Eichner¹⁰).

Die Ergebnisse von Hensel und Mann¹⁷ wurden also in bezug auf die thermische Schmerzgrenze mit dem oben angegebenen Wert übereinstimmen. Sie wurde also ungefähr bei 55 - 56 ° liegen. Bei dieser Temperatur wird der letzte heftige Wärmeschmerz wahrgenommen. Wenn man als kritische Temperaturgrenze in der Pulpa selbst 40 ° angibt (Klos und Rottke²³), so könnte sehr wohl die von Kluczka angegebene Temperatur von 50 ° (am Zahn) schädigend wirken, da nach Hensel und Mann¹⁷ eine Temperatur von 56,2 °C an der Schmelz-Dentingrenze einen Temperaturwert von 39,3 °C in der Pulpa erzeugt. Voraussetzung ist aber, daß man sich den Wert von 50 ° nicht an der Schmelz-Dentingrenze, sondern näher an der Pulpa entstanden denkt. Zweifellos könnte sich bei einem geringen Abstand Kavitätenboden-Pulpa selbst die von Titkemeyer²⁶ angegebene Temperatur von 46 ° (am Zahn) schädigend auf die Pulpa auswirken, da hier ebenfalls in der Pulpa selbst eine Temperatur erreicht wird, die über der kritischen Grenze von 40 ° liegt. Zu diesem Problem sagt Kluczka²⁵ selbst: Es wird sehr schwierig sein, hier absolute Werte zu finden. Folgende Autoren nahmen zu diesem Problem noch Stellung:

Hudack & Stephen u. Mc. Master¹²:

Gewebsveränderungen in der Pulpa entstehen schon bei 41 ° (Pulpentemp.)

Peyton & Henry¹²:

eine Temperatursteigerung von 16-23 ° (am Zahn) ist für die Pulpa erträglich.

Starling¹²:

8,5 ° Temperaturerhöhung in der Pulpa gibt irreversible Plasmaschäden.

Seltzer¹²:

Das Dentin toleriert Temp. bis 54,4 °C.

Hentschel¹²:

Das Gebiet zwischen 30 - 55 °C ist das Toleranzgebiet der Pulpa. Schmerzen treten außerhalb dieser Temperaturen auf, innerhalb dieses Gebietes nur, wenn eine schnelle Temperatursteigerung erfolgt (Erikson¹²).

Viele Autoren haben sich mit den Problemen des "Höchsttourigen Bohrens" befaßt und über viele Fragen auf diesem Gebiet bestehen unterschiedliche Ansichten, doch darüber herrscht bereits völlige Übereinstimmung, daß gerade beim Höchsttourigen Bohren Temperaturen, die für die Pulpa schädlich sind, äußerst leicht entstehen können.

Folgende Faktoren sind nun für die Wärmeentwicklung verantwortlich zu machen: Umfangsgeschwindigkeit, Form, Härte und Oberflächengestaltung des verwendeten Instrumentes, mechanische Eigenschaften des behandelten Materials, angewandter Bohr- oder Schleifdruck, Dicke der durchbohrten Schicht, Bohr- und Schleifzeit, Arbeitsweise, Kühlung. Sie alle stellen veränderliche Größen dar, von denen die erhaltenen Wärmewerte abhängig sind.

Man unterscheidet:

- a) die Reibungswärme, die bei Veränderung oben genannter Faktoren variabel ist,
- b) die Arbeitswärme, die für eine bestimmte Arbeit konstant ist, d. h. wenn eine gewisse Menge Zahnschubstanz in Bohrstaub verwandelt wird, so entsteht dabei eine gewisse Wärmemenge, ziemlich unabhängig, ob dies mit hohen oder höchsten Drehzahlen geschieht, wenn die entstandene Körnung des Bohrstaubes in beiden Fällen gleich groß ist (Walser ⁵⁴).

Nach Walser ⁵⁴ interessiert nun für zahnärztliche Zwecke nicht die entstehende Wärmemenge, sondern die Temperatur des Zahnes. Reibungs- und Arbeitswärme sind wohl die Ursachen für die Erwärmung des Zahnes, seine Temperatur im ganzen und an der Stelle der Bearbeitung hängt aber maßgeblich von seiner Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit ab. Die Wärmeleitfähigkeit ist bei den Zahnhartsubstanzen nach Untersuchungen von Stüben sehr gering.

Die Wärmeleitzahl beträgt

für das Dentin	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$\frac{\text{cal.}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{Grad}}$
für den Schmelz	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$\frac{\text{cal.}}{\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{Grad}}$

Als Vergleich hierzu besitzen die Phosphatzemente überraschenderweise Wärmeleitzahlen zwischen $3,9 - 4,6 \cdot 10^{-3}$, während bei Silikatzementen nur halb so hohe Werte vorliegen, nämlich $2,1 - 2,2 \cdot 10^{-3}$. Die Steinzemente wiesen gemäß ihrer Zusammensetzung Wärmeleitzahlen auf, die zwischen den beiden letzten Werten lagen.

Zur Fortleitung der produzierten Wärme nun über eine bestimmte Strecke im Dentin ist eine gewisse Zeit nötig. Wird eine bestimmte Präparation in relativ langer

Zeit durchgeführt, so wird ein Teil der entstehenden Wärmemenge vom Ort der Entstehung abgeleitet, was zur Erwärmung des Zahnes im ganzen führt. Außerdem wird Wärme in die Umgebung abgegeben. Unter diesen Umständen tritt zwischen der bearbeiteten Stelle und dem übrigen Zahn ein relativ geringes Temperaturgefälle auf. Wenn die Arbeit in kurzer Zeit geleistet wird, wobei also mehr Wärme in der Zeiteinheit entsteht, so wird das Temperaturgefälle größer, weil infolge der begrenzten Wärmeleitfähigkeit des Materials ein großer Teil der produzierten Wärmemenge am Ort der Bearbeitung bleibt. Wenn schließlich diese Arbeit in extrem kurzer Zeit geleistet wird, so dringt das Instrument so schnell in dem Material vor, daß die pro Zeiteinheit entstehende, sehr große Wärmemenge praktisch nicht mehr in die Umgebung abgeleitet werden kann. Das Temperaturgefälle wird hier extrem hoch, es kommt zu einer im Verhältnis zu den beiden vorher geschilderten Fällen sehr hohen Temperatur am Ort der Bearbeitung, während der übrige Zahn praktisch nicht erwärmt wird. Der Großteil der entstehenden Wärmemenge befindet sich im Bohrstaub, weil die minimale Schicht heißen Materials laufend entfernt wird. Dieser Fall tritt beim Turbinenbohren ein. Bisher blieb eine Kühlung außer Betracht, es ist aber klar, daß sie im letzten Fall den besten Effekt haben muß, da die relativ hohe Temperatur am Zahn nur ganz oberflächlich vorhanden ist (Walser ⁵⁴).

So konnte z. B. Hoffmann ¹⁸ an Dentinscheiben in Stärken von 1, 2 bis 3, 5 mm, die mit Thermochromen beschickt waren, bei Verwendung der KaVo-Turbine mit einer Diamant-Kugel von 1, 5 Ø unter normalem Handdruck folgende Temperaturen feststellen:

<u>Dicke der Dentinschicht:</u>	<u>gemessene Temperatur:</u>
1 mm	80 - 100 ° C
2 mm	bis 150 ° C
3, 5 mm	bis 290 ° C

Diese Temperaturen kamen also direkt am Berührungspunkt von Zahnhartsubstanz und Schleifer zustande, wobei dieser nicht allzu oft hin- und herbewegt wurde. Als Kühlung wurde nur die aus den Düsen austretende Luft verwendet.

Bei abgenutzten Schleifkörpern, bei denen der Wirkungsgrad bedeutend abfällt und die meiste Energie in Reibungswärme verwandelt wird, konnten sogar Temperaturen bis zu 600 ° an der Berührungsfläche gemessen werden (Hoffmann ¹⁸).

Dagegen wurden bei Anwendung des Sprays der KaVo-Turbine unter sonst gleichen Versuchsbedingungen am Pulpdach von präparierten Zähnen keine Temperaturerhöhungen nachgewiesen (Hoffmann ¹⁸).

Aus beiden Beispielen lassen sich drei der veränderlichen physikalischen Größen, die für die Wärmeentwicklung verantwortlich sind, in ihrer Auswirkung deutlich

erkennen;

- 1.) Mit zunehmender Dicke der durchbohrten Schicht steigt die Temperatur,
- 2.) bei abgenutzter Oberfläche der Bohrinstrumente entstehen besonders hohe Wärmewerte,
- 3.) geeignete Kühlung erniedrigt bzw. verhindert die auftretenden Wärmewerte.

Weiter zeigt sich der Temperaturablauf im Zahnhartgewebe weitgehendst von der eingeschlagenen Arbeitsweise abhängig. So wird die "intermittierende" Arbeitsweise, bei der während des Bohrvorganges fortlaufend kurzzeitige Pausen eingeschaltet werden, einen geringeren Temperaturanstieg auslösen als die kontinuierliche Bearbeitung des Zahnhartgewebes. Aus Untersuchungen von Stuben und Hoppe ⁴⁵ geht hervor: Wird ein Fissurenbohrer mit 50 gr belastet und das Zahnhartgewebe zwei Minuten lang kontinuierlich bearbeitet, so beträgt der maximale Temperaturanstieg am Pulpendach extrahierter Zähne 12 °, bei einer Andruckkraft des Bohrers von 70 gr unter sonst gleichen Bedingungen tritt der größte Temperaturanstieg auf; er beträgt 22 ° C. Bearbeitet man dagegen das Zahnhartgewebe intermittierend in einem Arbeits-Pausenverhältnis von 0,5 : 0,5 sek., so entsteht bei 50 gr Andruck nur eine Temperatur von 8 ° C, bei 70 gr eine Temperatur von 12 ° am Pulpendach. Anhand des letzten Beispiels soll nochmals die Auswirkung dieser variablen physikalischen Faktoren auf die Wärmeentwicklung gezeigt werden:

- 1.) Bei intermittierender Arbeitsweise entstehen kleinere Temperaturen an der Zahnhartsubstanz,
- 2.) Druckerhöhung bewirkt Wärmesteigerung (aber nur bis zur maximalen Leistung des Instruments).

Diese hier nun aufgeführten Beispiele beweisen deutlich, daß man durch die richtige Auswahl und die günstigste Anwendungsweise dieser variablen physikalischen Größen die Temperaturentwicklung an der Zahnhartsubstanz in weitestem Umfang beeinflussen kann.

Nur so werden auch folgende Ergebnisse richtig zu verstehen sein:

Polmann-Mooy: ⁴¹ Bei Schleifarbeiten mit höchsten Touren am vitalen Zahn unter Annahme einer verbleibenden Dentinschicht von 0,5 mm Dicke ist mit Temperaturanstiegen von 2,5 bis 5,5 ° C am Pulpendach zu rechnen, wenn mit Spray bzw. Wasserstrahlkühlung gearbeitet wird.

Fechner ¹³: Fräsen (Bohren) ruft durchwegs geringere Temperaturerhöhun-

gen hervor als Schleifen. Kühlung mit Spray oder Wasser verhindert beim Fräsen größere Temperaturerhöhungen. Überraschenderweise entstehen beim Bohren mit Turbinen keine nennenswerten Temperaturerhöhungen weder bei Anwendung von Kühlung noch ohne Kühlung.

Da die Arbeit von Fechner ¹³ als Fortsetzung zu der von Polmann aufzufassen ist, mußten beim Bohren am Pulpdach noch geringere Temperaturen entstehen wie oben angegeben.

Stüben & Hoppe ⁴⁵: Sie fanden bei Temperaturmessungen am Pulpdach an im Munde befindlichen Zähnen unter Verwendung des Airotors folgende Durchschnittswerte aus 10 Messungen:

	<u>Spray:</u>	<u>Luft:</u>
Diamant	- 4 °	+ 3 °
Bohrer	- 5 °	- 1 °

Nach ihren Untersuchungen tritt bei Mundtemperatur nur dann eine mehr oder weniger große Temperaturerhöhung am Pulpdach ein, wenn die Präparation ohne Wasserkühlung durchgeführt wird. Kühlt man die Kavitätenwand zusätzlich mit Wasser oder Spray, fällt die Temperatur am Pulpdach unter den Ausgangswert. Ein Diamant erzeugt eine größere Temperaturerhöhung im Dentin als ein Fissurenbohrer gleicher Größe.

Wie aus diesen letzten Beispielen hervorgeht, reichen die beim Airotor-Verfahren am Pulpdach auftretenden Temperaturen wahrscheinlich nicht aus, um in der Pulpa die kritische Temperatur von 40 ° C zu erzielen. So sind sich auch alle von mir erwähnten Autoren, die sich mit dem Temperaturproblem beim höchsttourigen Bohren befaßt haben, darüber einig, daß eine Schädigung der Pulpa ausgeschlossen ist, wenn die richtige Auswahl und günstigste Anwendungsweise der für die Wärmeentwicklung verantwortlichen physikalischen Faktoren erfolgt.

Als brauchbares Rezept hierfür wäre folgende Zusammenstellung zu werten:

- 1.) Verwendung von kleineren neuen Bohrern und Schleifern
- 2.) Benützung von Spray oder Wasser zur Kühlung
- 3.) Anwendung des intermittierenden Bohrens
- 4.) Begrenzung der Druckwerte zwischen 20 - 40 gr
- 5.) Ablösung der Turbinengeräte im nahen Pulpenbereich durch normaltourige Geräte

Zusammenfassung:

Die für die Pulpa schädlichen Temperaturen entstehen sehr schnell, wenn Fehler in der richtigen Auswahl und Anwendungsweise der für die Wärmeentwicklung verantwortlichen physikalischen Faktoren gemacht werden. Ist dies nicht der Fall, so liegen die am Pulpdach erzeugten Temperaturen unterhalb der Werte, die in der Pulpa die kritische Temperatur von 40° hervorrufen können. Außerdem befindet sich zwischen diesen in der Zahnhartsubstanz erzeugten Temperaturwerten und der thermischen Schmerzgrenze noch ein relativ großer Spielraum, so daß die Wärmeentwicklung als mechanischer Reizfaktor und damit als Schmerzquelle wahrscheinlich nicht die bedeutende Rolle spielen dürfte, wie vielfach angenommen wird. Das Gerät muß also auch hier als vorteilhaft beurteilt werden.

4. Schädigung und Schmerzauslösung durch traumatische Einwirkung

Das durch ein akutes Trauma beim Bohrprozeß seiner vor den verschiedensten Umwelteinflüssen chemischer und physikalischer Natur schützenden Epitheldecke beraubte Dentin stellt in dem freigelegten Bereich patho-histologisch definiert eine Wunde dar (Wannenmacher ⁵⁵ 1928). Wunden gibt es verschiedenster Art. Hier soll die Reiß- oder Quetschwunde der glatten Schnittwunde gegenübergestellt werden, denn gerade diese beiden Wundarten sind es - wenn man den Vergleich überhaupt wagen darf - die beim normaltourigen bzw. höchsttourigen Bohren entstehen.

Nach Adolph ¹ werden bei niedertourigen Präparationen die Odontoblastenfortsätze gequetscht, zerfasert und aus den Dentinkanälchen herausgezogen; demgegenüber deutet die ebenmäßige Glätte der höchsttourig bearbeiteten Dentineoberfläche sowie der zurückbleibende, stets gleichförmige feinpulvrige Dentinstaub darauf hin, daß die mit der Turbine stattfindende Traumatisierung der organischen Substanz ohne grobe Reiß-, Quetsch- und Zerreffekte vor sich geht. Anscheinend wird unter diesen rasch rotierenden, kaum in die Oberfläche einsinkenden Instrumenten nicht nur die anorganische Hartsubstanz, sondern vor allem auch das organische Weichgewebe nur ganz oberflächlich und in winzigen Quanten abgetragen, so daß eine derartige Wirkung nicht eintreten kann. Daraus kann abgeleitet werden, daß die durch diese verhältnismäßig "schonende" Mikrozertrümmerung hervorgerufene Alteration der organischen Substanz im Vergleich zu derjenigen, die eine niedertourige Arbeitsweise mit sich bringt, weniger tiefgreifend sein wird, weil die jeweilige Wunde am Odontoblastenfortsatz relativ glatt und unkompliziert ist. Es scheint hier eine Verletzungsart vorzuliegen, die dem chirurgisch-scharfen Schneiden nahe verwandt ist.

Fuhr ²⁵ berichtet dazu: Durch die hohen Umdrehungen der Bohrinstrumente wird die Zahnschubstanz durch einen scharfen Schnitt aus dem Molekülverband gelöst und

nicht wie bei dem bisherigen Bohrprozeß frasend gequetscht.

Adolph¹ fährt fort: Eine glatte Schnittwunde durch ein Gewebe bereitet auch weniger Schmerzen als z.B. eine schierend quetschende Verwundung. Es werden bei einer glatten Wundsetzung weniger Zellen eröffnet und deshalb auch weniger Stoffe frei, so daß die osmotischen und physikalisch-chemischen Reaktionen langsamer in Gang kommen und die zur Impulsaussendung notwendige Depolarisierung im Schmerzempfänger (dünne Nervenfasern) auch nur verzögert eintritt.

Weiter wird durch den hauchartig stauchenden Druck, der während der Behandlung auf dem Instrument lastet, eine geringfügige Bewegung bzw. Verdrängung der obersten Dentinschicht erzwungen und dadurch eine weitgehende Verengung oder sogar der Verschluß von Dentinkanälchen an ihrem Verletzungsquerschnitt herbeigeführt. Wo noch offene Kanälchen vorhanden sind, werden diese durch Verklebung der aus den Tubuli austretenden Flüssigkeit mit dem feinkörnigen Dentinstaub geschlossen. Dieser Verschluß stellt sozusagen einen physiologischen Wundverband dar und schützt das Dentin vor Austrocknung und die Pulpa vor exogenen Reizen.

Zusammenfassung:

Das durch den Bohrprozeß entstehende Trauma stellt zweifellos mit der Temperaturentwicklung die beiden mechanischen Reizfaktoren dar, die für eine evtl. Schädigung der Pulpa und die Schmerzauslösung hauptsächlich verantwortlich gemacht werden müssen.

Doch durch das glatte Abtragen sowohl des Zahnhartgewebes als auch des Weichgewebes in winzigen Quanten, den Verschluß der Dentinkanälchen durch Stauchung und Verklebung werden beim Airtor-Verfahren relativ günstige Verhältnisse in bezug auf Pulpenschädigung und Schmerzauslösung geschaffen. Das Gerät ist also auch hier durchaus positiv zu beurteilen.

5. Schmerzauslösung durch zu kaltes Wasser oder zu kalte Luft

Lange Zeit konnte keine eindeutige Meinung darüber erzielt werden, welche Kühlmethode beim höchsttourigen Bohren anzuwenden sei. Heute jedoch besteht wohl kein Zweifel mehr darüber, daß die Wasserkühlung und der Spray der Luftkühlung vorzuziehen sind (Hoffmann¹⁸). Neben einer größeren Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit bietet das Wasser gegenüber der Luft noch weitere Vorteile: Es dient als Schmiermittel während der Präparation, bei seiner Verwendung entstehen glattere Präparationsoberflächen (D. Gärtner¹⁸, M. Hoffmann¹⁸). Ein weiterer Vorteil gegenüber der Luft ist aber der: Es verhindert die Austrocknung der Dentinwunde (M. Hoffmann¹⁸). Bei Luftkühlung allein konnte sowohl LANGE LAND²⁶

als auch BRÄNSTRÖM⁶ Odontoblastenkernaspiration und somit eine Schädigung der Pulpa in sämtlichen Fällen feststellen.

Man kann also durchaus den Schluß ziehen, daß das Medium Wasser als Kühlmittel bei Anwendung von Luftturbinen zumindest dabei sein muß. Luft allein als Kühlmittel wird nicht nur von den meisten Autoren als ungenügend betrachtet, sondern wirkt sich auch noch schädigend aus.

Wie steht es nun beim AIROTOR mit der Temperatur der hier verwandten Kühlmitteln, Wasser und Luft?

Klos und Rottke²³ konnten folgende Ergebnisse für die KaVo-Turbine ermitteln:

Die Temperatur der zur Kühlung austretenden Luft liegt im günstigsten Fall nur gering über der Raumtemperatur (22 °). Der Spray ist in seiner Temperatur in Abhängigkeit von der Wassertemperatur im Behälter, der Innentemperatur des Gerätes und der Durchlaufzeit außerordentlichen Schwankungen unterworfen. Seine Temperatur beträgt am Bohrerkopf maximal ca. 32 ° C, nämlich bei 70 ° C Behältertemperatur und zweiminütiger Durchlaufzeit, jedoch 5 mm vom Bohrerkopf entfernt nur noch 26 ° C. Die physiologische Temperatur von 36 ° wurde in keinem Fall erhalten. Dieser Maximalwert von 32 ° wird aber nur bei 2/3 Füllung des Wasserbehälters und 2 1/2 stündiger Vorwärmzeit erreicht. Da meistens aber diese beiden Maße nicht eingehalten werden und niemand eine Durchlaufzeit von 2 Minuten durchführt, außerdem die Abkühlung des Sprays in einigem Abstand vom Bohrerkopf hinzukommt, kann man sich vorstellen, daß oft heftige Schmerzreaktionen am Zahn ausgelöst werden. Dies ist besonders beim ersten Ansetzen des Bohrers der Fall, da sich die Spraytemperaturen beträchtlich unter der von Hensel und Mann ermittelten Schwelle für Kälteschmerz von 26,4 °C befinden.

Zwei Mittel und Wege sind dann einzuschlagen, um für den Patienten die Behandlung erträglich zu gestalten: Die sog. Einschleichmethode (DRUM⁷), bei der man erst die Nebenzähne besprays und dann allmählich auf die Kavität einwirkt. Hier spielt der physiologische Vorgang der Adaptation eine Rolle, d. h. man kann es durch allmähliche langsame Abkühlung eines Zahnes erreichen, daß z. B. ein Spray von 22 °, der vor der Abkühlung einen Schmerz auslöst, nach der Kühlung nicht mehr als Schmerz empfunden wird.

Weiter muß der Patient auf einen etwaigen auftretenden Kältereiz vorbereitet werden, denn ob ein Spray von 22 ° C Schmerz erzeugt oder nicht, hängt nicht nur von psychologischen Gegebenheiten ab, sondern die psychische "Schmerzkontrolle" spielt dabei eine Rolle. Trifft nämlich der Kältereiz den Zahn unvermutet, so empfindet der Patient ihn unwillkürlich als bedrohlich und macht Abwehrbewegungen. Wird der Patient aber vorher darauf aufmerksam gemacht, daß ein Kältereiz auftreten wird, so kann er den Schmerz als harmlos kritisieren und ruhig ab-

warten, bis derselbe mit zunehmender Adaptation verschwindet. (Kommentar der Redaktion der Quintessenz zum Diskussionsbeitrag von Klos und Rottke zur Arbeit Drum ²⁴⁾)

Zusammenfassung:

Die bei der KaVo-Turbine ermittelten Luft- und Spraytemperaturen liegen weit unter der physiologischen Temperatur von 36°C , ja meistens sogar unter der Kälteschmerzschwelle von $26,4^{\circ}\text{C}$ und rufen deshalb Schmerzen am Zahn hervor. Dieser Kälteschmerz kann durch die Einschleimmethode und vorherige Aufklärung des Patienten verringert werden.

Das Kühlsystem am Airotor bedarf also einer Verbesserung.

6. Schädigung und Schmerzerzeugung durch Ultraschall

Von einigen Autoren wird beim höchsttourigen Bohren auch der Ultraschall für Veränderungen in der Pulpa verantwortlich gemacht. Als Beweis hierfür werden von BERNIER ²⁾ entdeckte Pulpenveränderungen, die durchwegs an der der Präparationsstelle gegenüberliegenden Pulpenseite gefunden wurden (rebound response) angeführt. An Hundezähnen machten sie sich in Form von Auflösung der Odontoblasten, Ödemen, Entzündungen und Veränderungen der Grundsubstanz bemerkbar. An den Menschenzähnen manifestierten sie sich in Form von unbeschriebenen degenerativen Prozessen, die abweichend von den Hundezähnen meist in der Mitte der Pulpa unter dem Kavitätenboden lagen. Dies führt Bernier ²⁾ auf die verschiedene Lage der Kavitätenpräparation und auf die anatomische Besonderheit der Menschen- und Hundepulpenkammern zurück.

Genauere Untersuchungen liegen hierüber noch nicht vor, aber es scheint durchaus möglich zu sein, daß derartige Veränderungen auf Ultraschalleinwirkungen zurückgeführt werden können, wenn man sich folgende Auswirkungen des Schalles in lebendem Gewebe vor Augen hält (A. Greuter ¹⁵⁾):

- 1.) Erwärmung der Gewebe durch Schallabsorption
- 2.) Mechanische Zerstörung derselben durch Schall und Kavitation
- 3.) Auslösung von chemischen Gewebeprozessen durch Schall

ad 1)

Die Erwärmung durch Schallabsorption steigt mit dem Absorptionskoeffizienten und der eingestrahelten Schallintensität.

An der Grenzfläche von zwei stark strukturierten Medien mit unterschiedlichem Schallkoeffizientenstand wie sie z. B. der Übergang Dentin-Pulpagewebe darstellt,

tritt der Effekt der Grenzflächenreibung auf. Diese bewirkt eine hohe Schallabsorption unmittelbar in der Grenzschicht und kann lokal zu hoher Erhitzung führen. Sie entsteht dadurch, daß vor und hinter der Kontaktstelle Ausschlag und Druckamplitude verschiedene Werte annehmen infolge des unterschiedlichen Scherverhaltens.

ad 2)

Direkte Zerstörung von Geweben durch Schall ohne wesentlichen Temperatureinfluß ist nur in Strukturen mit geringer mechanischer Festigkeit unter hoher Schalleinstrahlung denkbar. Besonders gefährdet sind die Zonen größter Druckamplitude in allfälligen stehenden Wellen. Diese nun entstehen da, wo Schallwellen auf Stellen mit einer Unstetigkeit in den akustischen Ausbreitungseigenschaften treffen, da hier die Schallwellen teilweise reflektiert werden. Hinlaufende und reflektierte Wellen überlagern sich und können eine stehende Welle bilden, wenn anregende Frequenz und Geometrie des Körpers in günstiger Beziehung zueinander stehen. Stehende Wellen zeichnen sich aber dadurch aus, daß an örtlich begrenzten Stellen große Druck- und Bewegungsamplituden auftreten. Da nun die Pulpa zweifellos ein Gewebe von geringer mechanischer Festigkeit darstellt, das Dentin Unstetigkeiten in den akustischen Ausbreitungseigenschaften aufweist, können also hier stehende Wellen entstehen, deren große Druckamplituden sich zerstörend auf die Pulpa auswirken.

Weiter wäre auch eine Schädigung der Pulpa durch Kavitation denkbar, die vor allem in blut- und lymphreichen Geweben auftritt. Unter Kavitation versteht man die Bildung gashaltiger oder nahezu gasfreier Hohlräume in Flüssigkeiten oder flüssigkeitsreichen Geweben unter Einwirkung von Schall ausreichender Intensität. Diese kleinen Blasen fallen nämlich, nachdem sie auf Resonanzgröße angewachsen sind, sehr rasch zusammen unter Aussendung einer Druckwelle, die ein Vielfaches der anregenden Schalldruckamplitude betragen kann.

ad 3)

Die durch Schall erzeugten chemischen Sekundär-Effekte sind äußerst mannigfaltig. Je nach den beteiligten Stoffen lassen sich hauptsächlich Oxydation, Reduktion oder Depolymerisation erkennen. Auf diese Weise wären evtl. nach meiner Auffassung auch die von Bernier entdeckten umschriebenen Bezirke von Degeneration, die sich bei den menschlichen Zähnen in der Pulpenmitte meistens fanden, zu erklären.

Zusammenfassung:

Eine Schädigung der Pulpa und damit auch Schmerzauslösung durch Ultraschall, der sich in Form von Erwärmung, mechanischer Zerstörung und chemischer Ver-

änderungen der Gewebe auswirken kann, scheint durchaus möglich zu sein. Genauere experimentelle Untersuchungen mit zuverlässigen Ergebnissen liegen hierüber aber noch nicht vor. Es kann also momentan über den Airotor hinsichtlich dieser evtl. schwerwiegenden nachteiligen Eigenschaft der Ultraschallaussendung noch kein gültiges Urteil gefällt werden.

GESAMTÜBERBLICK:

Es wurden die beim Bohren und Schleifen entstehenden mechanischen Reizfaktoren Druck, Vibration, Temperatur, mechanisches Trauma, Kühlung und Ultraschall, die für die Schmerzauslösung und Schädigung der Pulpa verantwortlich zu machen sind, in ihrer Auswirkung beim Airotor-Verfahren untersucht. Als Ergebnis geht hervor:

Die schmerzarme Behandlung bei Verwendung von Luftturbinen ist als Resultat des guten Abschneidens dieser Geräte in bezug auf die mechanischen Reizfaktoren Druck, Vibration, Temperatur, mechanisches Trauma zu werten, während die "Schmerzauslösung durch zu kalte Kühlmittel" nur noch unter optimalen Bedingungen als ausreichend zu werten ist. Die Ultraschalleinwirkung als Schmerzquelle aber bedarf erst noch endgültiger Klärung. Rein klinisch gesehen stellen also die Luftturbinen zweifellos eine wertvolle Unterstützung für den Behandler dar.

Trotzdem aber sollte es Allgemeingut aller Zahnärzte sein, daß beim Bohren und Schleifen nicht die klinisch-technischen, sondern die biologisch-histologischen Grundsätze im Vordergrund stehen.

Über die bisher hierüber durchgeführten Untersuchungen sollen die im folgenden Kapitel gemachten Ausführungen berichten.

III. LITERATURÜBERSICHT ÜBER DIE HISTOLOGISCHEN AUSWIRKUNGEN

1. des höchsttourigen Bohrens und Schleifens
2. des hoch- und normaltourigen Bohrens auf die Pulpa und eine vergleichende Auswertung derselben

Die ersten histologischen Pulpenuntersuchungen auf Bohrprozesse hin stammen von folgenden Autoren:

Bereits 1922 untersuchte VOGELSANG ⁵³ die Reaktion der Pulpa auf plötzlichen Schmelzverlust.

Das gleiche führte WANNENMACHER ⁵⁵ 1928 nochmals aus. Er glaubte, daß die Schädigung der Pulpa auf die Präparation hin verschärft würde, wenn die Kavität offen gelassen wird.

Van HUYSEN und GURLEY ²⁰ (1939) untersuchten dann die Reaktion der Pulpa auf Kavitätenpräparation an Hundezähnen. Sie betonten nachdrücklich die größte Achtsamkeit beim Präparieren der Zähne.

REICHBORN - KJENNERUD ²⁶ (1941) drückte aus, daß thermische Reize als Ergebnis der Präparation eine Entzündung des Pulpengewebes verursachen können. Er empfahl Kühlung der Zähne während der Präparation.

BARKER ²⁶ (1942) glaubte andererseits, daß die Hitze nicht schädigen würde, wenn sie nicht zu stark sei.

SHROFF ²⁶ (1946 und 1947) hielt ebenfalls bei Präparationen große Sorgfalt für notwendig.

SEELIG und LEFKOWITZ ²⁶ (1950) waren der Meinung, daß die Präparation ein Trauma im Dentin verursachen würde. Seelig (1951) legte dar, daß die Pulpenreaktionen stärker sein würden, wenn die Präparationen im nicht kariösen Dentin ausgeführt werden.

BOYD und van HUYSEN ⁵ (1953) stellten an Hundezähnen Vergleiche zwischen der pulpären Reaktion auf Airbrasive und Stahlbohrer an.

ENGEL ¹¹ (1953) beschliff Zähne von Goldhamstern und untersuchte sie dann histologisch. Er fand hyperämische, entzündliche und atrophische Veränderungen des Pulpengewebes.

JAMES & SCHOUR ²¹ (1955) versuchten die Wirkung der Kavitätenpräparation auf die Pulpa allein festzustellen, wobei sie in einer großen flachen Kavität eine tiefere Stelle anlegten und diese mit einer Goldfolie überdeckten. Bei zwei vor-

hergehenden Arbeiten machten sie nämlich die Füllmittel Zinkoxyd-Nelkenöl und Guttapercha mit für die Reaktion der Pulpa verantwortlich.

Unter Berücksichtigung der Umdrehungsgeschwindigkeit wurde dann von HANSEN und NIELSEN ¹⁶ (1956) die Wirkung der Ultraschallpräparation mit Präparationen bei 12 000 U/min. unter Spray an Zähnen von Guinea-Schweinen verglichen.

ZACH & COHEN ⁵⁷ (1958) versuchten an Zähnen von Rhesus-Affen eine Beziehung zwischen Menge der entfernten Zahnschubstanz und der Reaktion der Pulpa zu finden. Die Präparationen erfolgten bei 140 000 U/min. unter Spraykühlung.

LANGELAND ²⁶ (1957) beschliff Zähne junger Menschen mit Drehzahlen zwischen 6 000 U/min. und 50 000 U/min. mit und ohne Luft- und Wasserkühlung.

MARSLAND und SHOVELTON ^{30 u. 31} (1957) präparierten Zähne mit Geschwindigkeiten von 500 U/min. bis 15 000 U/min. teils mit und teils ohne Kühlung. Außerdem untersuchten sie 1958 die Auswirkung von Drehzahlen zwischen 10 000 U/min. - 40 000 U/min. auf die Pulpa, mit und ohne Sprayanwendung.

LEFKOWITZ, HAMILTON und POSTLE ²⁷ (1958) beobachteten dann die Pulpa-Veränderungen nach Präparationen mit 3 000 U/min. und 24 000 U/min. mit Spray sowie nach Ultraschall und Airbrasive Präparationen an Hunde- und Menschen-Zähnen.

SWERDLOW und STANLEY ^{47 u. 48} (1958-59) untersuchten die Reaktion der menschlichen Pulpa nach Präparationen mit 20 000 U/min. mit und ohne Spray unter Anwendung von diamantierten Schleifern, sowie nach Anwendung von 150 000 U/min. mit Bohrern unter Sprayzusatz.

BERNIER und KNAPP ² (1959) unternahmen Versuche an Hunde- und Menschenzähnen mit Tourenzahlen von 26 000, 40 000, 45 000 und 100 000 U/min.

1. Die ersten Untersuchungen, die sich mit den Reaktionen der Pulpa auf Luftturbine-Präparationen befaßten, wurden von den nun im folgenden aufgeführten Autoren unternommen.

Bevor aber von Reaktionen der Pulpa und damit von Veränderungen derselben als Folge des höchsttourigen Bohrens gesprochen werden soll, ist es notwendig, die klinisch und histologisch "normale" Pulpa zu definieren. Die normale Pulpa stellt nach O. Müller ³⁵ eine Seltenheit dar, da auch an klinisch intakten Zähnen meistens Veränderungen anzutreffen sind, so z.B. Verkalkungen, reticuläre Atrophie und Hohlraumbildungen. Histologisch müßte eine normale Pulpa (MAYER ¹, ORBAN ⁵⁶) folgendermaßen aussehen:

Bei HE-Färbung verlaufen die regelmäßigen Dentinkanäle des gewöhnlich dunkel gefärbten Dentins ununterbrochen durch das meist blasse eosinophile Praedentin.

Zwischen Praedentin und Odontoblastenschicht befindet sich die deutlich ausgebildete pulpo-dentinale Membran (James ⁵⁶). Am Praedentin entlang sind die säulenförmigen Odontoblasten gruppiert, die ovale Kerne haben. Von jeder Zelle zieht ein Cytoplasmafortsatz in einen Dentinkanal als Tomes'sche Faser. In Richtung auf die Zahnwurzel werden die zylindrischen Zellen kubischer, am Apex spindelförmig und flach. Auf die Odontoblasten folgt eine zellarme Zone, in der oft Kapillaren zu beobachten sind. Das Pulpengewebe besteht hauptsächlich aus lockerem Bindegewebe, Zellen und Interzellulärsubstanz. Im Laufe der Entwicklung nehmen die Zellen ab und die Interzellulärsubstanz zu, so daß die normale junge Pulpa zellreich und faserarm ist, die normale alte Pulpa zellarm und faserreich. Unmittelbar an den Gefäßen liegen spindelförmige Mesenchymzellen und Histiocyten finden sich in einiger Entfernung von den Gefäßen.

Nachdem nun die "normale" Pulpa klar definiert ist, können auch ihre Veränderungen auf höchsttouriges Bohren mit der Luftturbine untersucht werden.

Folgende Autoren haben sich in zeitlicher Reihenfolge geordnet mit diesem Problem beschäftigt:

a) Kaare Langeland ²⁶ 1958:

14 Zähne von Jugendlichen wurden mit dem Borden-Airotor bei Drehzahlen von 250 000 U/min. unter Spraykühlung präpariert. Teils wurden die Zähne nach der Präparation sofort extrahiert, teils erst nach einer Beobachtungszeit von 7 Tagen. In letzterem Fall wurden die Kavitäten mit Zinkoxyd-Eugenol-Einlagen versehen. Bei den sofort extrahierten Zähnen zeigte sich eine geringe Zahl von Odontoblastenkernen in den Dentinkanälchen, bei den nach 7 Tagen extrahierten Zähnen fanden sich wiederum Odontoblasten in den Tubuli und eine Konzentration von neutrophilen Leukocyten in dem unter dem Kavitätenboden liegenden Reaktionsgebiet.

Als Ursache für die pathologischen Veränderungen in der Pulpa sieht Langeland die Hitzeentwicklung bei mangelnder oder unzureichender Spraykühlung. In späteren Versuchen konnte er zeigen, daß auch diese initiale Reaktion durch zusätzliche Kühlung (Spray des Units) sich vermeiden läßt. Seine Versuchsergebnisse mit der Luftturbine zeigten keine wesentlichen Unterschiede zu den bei normalen und hohen Touren ermittelten.

In den den Bohrversuchen vorhergehenden Untersuchungen von 400 mit Füllungs-materialien versehenen Zähnen stellte Langeland fest, daß viele der bisher gebräuchlichen Bewertungskriterien für pathologische Veränderungen an der Pulpa nicht gültig sind, da sie häufig auch in den histologischen Präparaten von klinisch völlig gesunden Kontrollzähnen zu finden waren.

So arbeitete Langeland Untersuchungsmethoden aus, durch die Irrtümer und falsche Deutungen vermieden werden sollten. Er kam zu folgendem Ergebnis:

Soll ein Befund als pathologische Reaktion der Pulpa gedeutet werden, so müssen eines oder mehrere der unten angeführten Anzeichen vorhanden sein:

- 1.) Odontoblastenkerne in den Dentinkanälchen, die von dem Experiment beeinflusst wurden und Reduzierung der Odontoblastenschicht unter den angeschnittenen Dentinkanälchen. Diese Kerne müssen entschieden außerhalb des Gebietes, das direkt den Eindrücken der Extraktionszange gegenüberliegt, beobachtet werden und ihr Auftreten darf nicht durch Bohren oder Schleifen nach der Extraktion hervorgerufen sein.
- 2.) Entzündungs-Zellen in der Odontoblastenschicht in dem Gebiet, wo Odontoblastenkerne in Dentinkanälchen gedrungen sind.
- 3.) Entzündungs-Zellen im zentralen Pulpagewebe in dem Gebiet unter der experimentellen Kavität.
- 4.) Erweiterte Kapillaren in den unter 2. und 3. genannten Gebieten.
- 5.) Braunes Pigment als Zeichen einer Zersetzung von Erythrocyten.
- 6.) Hohlraumbildungen in der Grundsubstanz, vorausgesetzt, daß Entzündungszellen oder Ablagerungen in oder neben den Hohlräumen erkennbar sind.

Nicht als Anzeichen einer pathologischen Reaktion sind folgende Befunde zu betrachten:

- 1.) Hohlräume (reticuläre Atrophie) in der Odontoblastenschicht und in der Mitte der Pulpa.
- 2.) Fettige Degeneration oder Fettzellen. Diese können nicht demonstriert werden, weil bei der histologischen Präparation fettlösende Stoffe angewendet werden.
- 3.) Vakuolen in den Odontoblasten, Nukleoli in den Odontoblastenkernen und Schrumpfung der Odontoblasten.
- 4.) Eingestreute Erythrocyten
- 5.) Erweiterte Kapillaren in der Odontoblastenschicht, die kein Zeichen einer Überproduktion von Odontoblasten sind.

Diese Befunde sind nach Langeland deshalb nicht als pathologische Anzeichen zu betrachten, da sie, wie oben bereits erwähnt, auch an klinisch vollkommen gesunden Zähnen auftreten, teilweise aber auch von der histologischen Technik (3, 4)

und der Extraktion abhängig sind (4, 5). Vor allem also die in den Dentinkanälen auftretenden Odontoblastenkerne (aspirated Odontoblasts) und die gleichzeitige Reduzierung der benachbarten Odontoblastenschicht unter dem Kavitätenboden, sowie die oben angegebenen weiteren Punkte sind nach Langeland der einzig sichere Beweis für die Auswertung des Schädigungsgrades der Pulpa; fehlen sie dagegen, so war das einwirkende Agens (Füllmaterialien, Bohrprozeß) unschädlich.

b) Nygaard-Östby ¹² 1958:

Bei Kindern von 10 - 14 Jahren wurden an Prämolaren Kavitäten der Klasse I und V präpariert und mit Amalgam gefüllt. Die Beobachtungszeit betrug 32 - 36 Tage. Als Kontrolle wurden homologe Zähne benutzt, die ohne Kühlung bei 6 000 U/min. präpariert wurden. Seine Ergebnisse stimmen im wesentlichen mit denen von Langeland überein. Auch er fand, daß die Pulpenreaktionen auf Präparationen mit dem Airtor nicht größer sind als jene bei 6 000 U/min. ohne Kühlung.

c) H. Mühlemann und K. Rateitschak ³⁴ 1959:

21 Zähne von Kindern zwischen 11 und 13 Jahren wurden mit dem Airtor behandelt. Präpariert wurden ohne Anästhesie vom selben Operateur bucco-cervikale, möglichst tiefe Kavitäten. Die Behandlung, welche in Studie I stets unter optimaler Einstellung des Wasserstrahls erfolgte, benötigte bei der Airtorbehandlung 15-30 Sek., bei einer gemessenen unbelasteten Tourenzahl der Turbine von ca. 250 000 U/min. unter Verwendung eines scharfen Hartmetall-Fissurenbohrers mit Querhieb von 1 mm Ø. Nach der Präparation wurden die Kavitäten mit Watte getrocknet, mit Fletcherzement verschlossen und in steigenden Abständen nach 2 - 14 Tagen unter einer Xylocain-Epinephrin-Anästhesie sehr vorsichtig extrahiert; die Färbung war HE.

Studie II. Nach dem Vorliegen der histologischen Befunde der Studie I wurden weitere 8 Praemolaren absichtlich ohne Wasserstrahl, aber unter Luftkühlung zur Hälfte ohne Lokalanästhesie, doch sonst wie in Studie I möglichst tief mit dem Airtor präpariert. Die Zähne gelangten innerhalb 0 - 2 Tagen nach der Präparation zur Extraktion.

Ergebnisse Studie I:

Ohne Ausnahme wurden in den Serienschnitten aller jugendlichen Pulpen, auch in denjenigen unbehandelter Zähne, gewisse Abweichungen von der Lehrbuchnormalität nachgewiesen. Folgende Veränderungen ließen sich an den behandelten Zähnen feststellen:

A) Vakuolenbildung in der Odontoblastenschicht	in 96 % der Fälle
B) sichtbare Kapillaren in der Odontoblastenschicht	in 58 % der Fälle
C) Verlagerung der Odontoblastenkerne in die Dentinkanälchen	in 57 % der Fälle
D) Mikrohämorrhagien	in 48 % der Fälle
E) Unschärfe Begrenzung der Odontoblastenschicht	in 70 % der Fälle
F) Vakuolen im Pulpagewebe	in 52 % der Fälle
G) Rundzellen und Leukocyten Infiltrate	in 31 % der Fälle
H) Histiocytäre Reaktion	in 25 % der Fälle
I) Degenerative Veränderungen	in 20 % der Fälle
K) Höhlenbildung im Pulpagewebe (Hydrops)	in 15 % der Fälle

In der Gesamtheit beurteilt, zeigten 85 % der Airtor-Zähne leichte histologische Pulpaveränderungen, wie sie auch nach der Kavitätenpräparation mit den konventionellen niedrigtourigen Verfahren üblich sind. Drei Airtor-Pulpen wiesen Veränderungen auf, die als schwer zu bezeichnen sind (Höhlenbildungen), obwohl die Kavitätenpräparation mit großer Sorgfalt und bei scheinbar einwandfrei funktionierendem Kühlsystem vorgenommen worden war. In zwei von diesen drei Fällen war die Höhlenbildung nicht nur im Bereich des Kavitätdentins, sondern auch im Sinne Bernier's auf der gegenüberliegenden Seite des Pulpahorns vorhanden ("Rebound response", "Contre-coup").

Studie II:

Die Tatsache, daß an einzelnen Airtor-Zähnen selbst unter vorsichtiger Wasserkühlung schwere Pulpaveränderungen zu finden waren, Schädigungen, über deren Reversibilität und Spatschicksal leider weder Günstiges noch Ungünstiges bekannt ist, zwang die Autoren abzuklären, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Blasenbildung mit einem Hitze-Effekt in Zusammenhang gebracht werden könnte. Es ergab sich, daß die unter Luftkühlung und zur Hälfte ohne Anästhesie präparierten Zähne fast ausnahmslos hydropische Pulpaveränderungen aufwiesen. Die Höhlenbildung war unter diesen Bedingungen fast die Regel, auch an Zähnen von Erwachsenen.

Als Facit ihrer Untersuchungen berichten die Autoren folgendes:

Mit den erforderlichen Kenntnissen und der verantwortungsvollen Vorsicht jedoch angewendet, scheint das höchsttourige Arbeiten sich zu einer für die Zahnpulpa

unschädlichen Methode zu entwickeln. Gleichzeitig soll hier jedoch die Warnung ausgesprochen werden, nie den Airotor nur mit der Luftkühlung zu benutzen.

d) Helga Schepers⁵⁰ 1959:

10 jugendliche kariesfreie Zähne, teils Milchmolaren, teils bleibende Praemolaren, die aus kieferorthopädischen Gründen extrahiert werden sollten, wurden unter Injektion mit Novocain-Suprarenin mittels Borden-Airotor oder Siemens-Turbine occlusal angebohrt. Einige wurden mit einer pulpennahen Kavität versehen, bei anderen wurde die Pulpa eröffnet. Von der Autorin wurden absichtlich kariesfreie jugendliche Zähne von gesunden Patienten für die histologischen Untersuchungen gewählt, weil bei ihnen vor der Bearbeitung mit der Dentalturbine keine wesentlichen pathologischen Vorgänge in der Pulpa zu erwarten waren. Alle Zähne wurden 5 - 10 Min. nach dem Anbohren entfernt. Außerdem wurden 5 verlagerte Weisheitszähne des UK und 2 retinierte Eckzähne, die ebenfalls mit der Luftturbine bearbeitet wurden, histologisch untersucht. Ergebnis: Beim Bohren mit 300 000 U/min. nur unter Luftkühlung waren lokale Verbrennungsprozesse in der Pulpa, und zwar in den Fällen, in welchen die Pulpa eröffnet wurde, festzustellen. Außerdem fanden sich Verbrennungsprozesse im Dentin. Oftmals wurde starke vakuolige Degeneration der Odontoblasten im Bereich der Bohrstelle beobachtet, und zwar um so stärker, je geringer die Dentinzwischenschicht zwischen Kavitätenboden und Pulpa war. An Stellen mit äußerst starker Vakuolenbildung sahen die Odontoblasten wie Brandblasen aus. Diese Vakuolenbildung war an allen 17 Präparaten festzustellen, aber nur im Bohrbereich. Über die Zeit, in der die Zerstörung der Odontoblasten eintritt, ist bisher wenig bekannt. Wir wissen lediglich, daß sie als regressive Veränderung angesehen wird und daß sie durch äußere und innere Bedingungen auftritt.

Wenn die Pulpen vor dem Bohrprozeß keine Schädigung aufwiesen, muß nach diesen Untersuchungen die Vakuolenbildung in der Odontoblastenzone in wenigen Minuten vor sich gehen. Das stimmt mit der allgemeinen Anschauung in der Medizin, daß hochdifferenzierte Zellen am schnellsten zerstört werden, überein. Die Verbrennungsprozesse im Dentin erweisen sich bei HE-Färbung als dunkle Zone an der Oberfläche des gebohrten Dentins. Die Grundsubstanz des Dentins bleibt hell, der Inhalt der Dentinkanälchen ist stärker gefärbt. Nach Ansicht der Autorin kommt es durch die große Hitzeeinwirkung im Augenblick des Traumas zur Koagulation der organischen Substanz in den Dentinkanälchen, der Inhalt verkohlt und erscheint dadurch dunkler. Weiter wird die Möglichkeit eingeräumt, daß durch diesen Vorgang in Zukunft ein verstärkter Schutz gegen Sekundärkaries zu erwarten sei und die Vermutung ausgesprochen, daß das Eröffnen der Pulpa mit höchsten Drehzahlen ein Weg zu einer neuen Amputationsmethode ist, da anhand von verschiedenen Präparaten die Oberfläche der Wurzel-

pulpa durch eine schmale Schicht scharf abgegrenzten verbrannten Gewebes abgeschlossen wird und dadurch die ganze darunterliegende Wurzelpulpa keine wesentlichen pathologischen Veränderungen mehr erfährt.

Zusammenfassend berichtet die Autorin:

Beim Bohren mit 300 000 U/min. bei ausschließlicher Luftkühlung treten also lokale Verbrennungsprozesse in der Pulpa und im Dentin auf. Vielleicht können diese in Zukunft für therapeutische Zwecke nutzbar gemacht werden (neue Amputationsmethode, Verhinderung einer Sekundärkaries). Mit einer an Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit kommt es außerdem zu einer vakuoligen Degeneration der Odontoblasten, die den Untersuchungen nach im Augenblick des Traumas entstehen muß. Fernwirkungen von Bohrtraumata auf die Pulpa (Hyperämie, Abszesse oder andere entzündliche Erscheinungen) wurden nicht beobachtet.

e) Marianne Weder ⁵⁶ 1960:

An 3 kariesfreien bleibenden Zähnen von Patienten im Alter von 12 - 60 Jahren, die aus kieferorthopädischen und prothetischen Gründen extrahiert werden mußten, wurden große Kavitäten unter Verwendung des Arotors angelegt. Als Spray wurde ein Luft-Wassergemisch von jeweils 50 % benutzt. Die Zähne wurden mit Fletcher-Zement versorgt und nach 48 Stud. extrahiert. Färbung erfolgte mit HE und Azan.

Patient 1: 60 Jahre

An + 1 wurde eine große distale Kavität präpariert.

Histologischer Befund:

Dentin: An der Grenze zwischen Sekundärdentin und regulärem Dentin befindet sich eine kraftig angefarbte Zone, zu deren beiden Seiten die jeweiligen Dentinkanäle unregelmäßig verlaufen. Vielfach ist diese Zone durch vakuolenähnliche Hohlräume unterbrochen. Mit der Azan- und mit der HE-Färbung sind sowohl in den Sekundärdentinkanälen als auch in den regulären Dentinkanälen langgestreckte, dunkle Körper zu sehen.

Praedentin: An 16 Schnitten sind im Zentrum des Pulpenkanals noch Andeutungen von Pulpengewebe festzustellen, das vom Praedentin umgeben wird. Im anderen Teil des Wurzelkanals ist kein Praedentin vorhanden.

Odontoblastenschicht: In diesen kleinen Bezirken sind noch einige Reste der Odontoblastenschicht festzustellen, die sonst in der ganzen Pulpa nicht vorhanden ist.

Gefäße: In den Resten des Pulpagewebes der Kronenpulpa und zum Teil in der

Wurzelpulpa verlaufen dicke gewundene Gefäße. Diese Gefäße sind das einzige, das vom Pulpengewebe überhaupt noch deutlich zu erkennen ist.

Patient 2: 60 Jahre

An + 7 wurde eine MO-Kavität angelegt. Abstand Kavitätenboden-Pulpa 2, 8 mm.
Histologischer Befund:

Dentin: Im Verlauf der Kronenpulpa ist über dem Praedentin im Dentin eine dunkel angefärbte Zone entstanden. In dieser Zone sind die Dentinkanäle in ihrem regelmäßigen Verlauf gestört, Unterbrechungen und Lücken treten auf. An anderen Stellen wirken die Dentinkanäle aufgefasert. In den mit der Azan-Färbung behandelten Präparaten sind Odontoblastenkerne festzustellen, die in die Dentinkanäle eingewandert sind.

Praedentin: Das Praedentin ist in der ganzen Pulpa vorhanden, aber unregelmäßig in seinem Verlauf. Über dem Pulpenkammerdach bildet das Praedentin einen schmalen Saum.

Odontoblastenschicht: Eine reguläre Odontoblastenschicht ist in dieser Pulpa nicht vorhanden. Sie ist flach und zellarm, zum Teil vakuolig verändert.

Übriges Gewebe: Das Pulpengewebe besteht aus einem weitmaschigen, zellarmen Syncytium, teils zart-, teils grobfaserig. Die Pulpa ist atrophisch mit vielen Verkalkungen. Bei stärkerer Vergrößerung haben an einigen Gefäßen Erythrocytenaustritte stattgefunden.

Patient 3: 12 Jahre alt

An + 4 wurde MOD-Kavität präpariert. Abstand Kavitätenboden-Pulpa 2, 6 mm.
Histologischer Befund:

Dentin: In den azangefärbten Präparaten sind Odontoblastenkerne festzustellen, die in die angeschnittenen Dentinkanäle eingewandert sind.

Praedentin: Das Praedentin ist regelmäßig ausgebildet und scharf begrenzt. In der Kronenpulpa ist das Praedentin meist nur als schmaler Saum und in der Spitze des buccalen Pulpenhorns überhaupt nicht vorhanden.

Odontoblastenschicht: Die Odontoblasten der Kronenpulpa werden durch regelmäßig angeordnete, mittelgroße Vakuolen büschelig auseinandergedrängt.

Gefäße: Die Gefäße sind sehr zahlreich und scheinen in der Kronenpulpa, besonders im buccalen Pulpenhorn, vergrößert.

Übriges Gewebe: Das übrige Pulpengewebe besteht aus einem etwas verdichteten zell- und faserreichen Syncytium, nur das palatinale Pulpenhorn setzt sich aus besonders weitmaschigem und zellarmem Gewebe zusammen.

An den drei Versuchszähnen dieser Gruppe wurden nur leichtere histologische Veränderungen festgestellt;

- 1.) Odontoblastenkerne in den Dentinkanälchen in 3 Fällen
- 2.) Unterbrechung der Grenzlinie des Praedentins in 2 Fällen
- 3.) Vakuolen in der Odontoblastenschicht in einem Fall
- 4.) Schrumpfung und Reduzierung der Odontoblastenschicht in einem Fall
- 5.) Verwaschene Struktur und unscharfe Begrenzung der Odontoblastenschicht in einem Fall
- 6.) Hohlräume im Pulpengewebe in zwei Fällen
- 7.) Geringe Gefäßveränderungen in zwei Fällen
- 8.) Erythrocytenaustritte in einem Fall
- 9.) Geringe ödematöse Veränderungen in zwei Fällen
- 10.) Leichte Dentinveränderungen in zwei Fällen

Die Verfasserin kommt zu folgendem Ergebnis:

Die histologisch feststellbaren Veränderungen der untersuchten Pulpen müssen als gering bezeichnet werden. Die klinische Anwendung des Arotors mit Spray erscheint daher vertretbar.

f) Kluczka ²⁵, Ehlers und Fuhr 1960:

Siebzig im wesentlichen pulpengesunde, kariesfreie Zähne, die entweder verlagert waren oder aus kieferorthopädischen oder prothetischen Gründen extrahiert wurden, kamen zur Untersuchung. Einzelne Zähne wiesen auch bereits Füllungen auf, ganz vereinzelte zeigten initialpulpitische Beschwerden. Diese wurden aber hier aus naheliegenden Gründen nicht berücksichtigt. Vor der Extraktion erfolgte eine Kavitätenpreparation mit dem Borden-Airrotor unter höchsten Drehzahlen. Aus Vergleichsgründen wurde bei einigen Zähnen lediglich eine Luft-, bei anderen eine Spraykühlung angewandt. Sie wurden unter Lokalanästhesie meist sofort nach dem Bohrprozeß entfernt. Die Färbung der histologischen Präparate erfolgte mit Hämatoxylin-Eosin. Bohrzeit 50 - 80 Sek. mit Unterbrechung mit Fissurenbohrer von 1,4 bis 2 mm Ø oder Diamantschleifer bis 1,4 mm. Im folgenden werden nun von den Autoren einige Fälle, die mit unterschiedlicher Präparationstechnik und Kühlung behandelt wurden, angeführt:

Fall 1) An 8. eines 22-jährigen Patienten erfolgte eine pulpennahe Präparation nur mit Luftkühlung. Hierbei kam es zu geringen Veränderungen der Odontoblasten, nämlich zu einer nicht ausgeprägten hydropischen Stauung in der Odontoblastenreihe. In der Pulpa sieht man eine leichte Hyperämie. Im ganzen kann man entsprechend der Bohrstelle gegenüber in der Pulpa Verbrennungen erkennen. Solche Verbrennungstraumen haben im Mesenchym eine schlechte Heilungstendenz. Ob eine Regenerationsfähigkeit der Pulpa möglich ist, wird wohl schwer zu entscheiden sein.

Fall 2) An 8 - eines 29jährigen Patienten traten bei forscher Präparation nur mit Luftkühlung am Kavitätenboden Verbrennungen der oberflächlichen Dentinschicht auf. In der Mitte gegenüber der Kavität Ödembildung in der Odontoblastenreihe. Am seitlichen Teil der Kronenpulpa Verbrennungstraumen und ein kleines Ödem. Auch dieser Pulpenteil könnte mit dem Trauma in Zusammenhang gebracht werden. Weiter fanden sich in einem Wurzelkanal Gefäßerweiterungen.

Fall 3) An 8 + einer 22jährigen Patientin wurde eine Präparation unter mittelmäßiger Sprayanwendung bis nahe ans Pulpdach durchgeführt. Das histologische Bild zeigt ein Zurückziehen der Odontoblasten in Richtung Pulpa; dadurch haben sich Hohlräume gebildet. Im Bereich dieser Partie sind die Odontoblasten vollkommen zerstört. Sie reißen ab, hierdurch kommt es wohl dort zu einem Dentintod.

Fall 4) An - 5 einer 20jährigen Patientin kam es bei forscher Präparation und zusätzlich mittelmäßiger Anwendung des Sprays zu irreparablen Veränderungen der Pulpa mit Verbrennungen am Boden der Kavität. Entsprechend diesem Defekt sieht man in der Pulpa ein Ödem, in der Kanalpulpa starke Stauungserscheinungen und Gefäßrupturen. Die dort begonnene absolute Entzündung hat sich auf das Periodontium fortgesetzt. Die Pulpa dürfte als nicht mehr lebensfähig anzusprechen sein.

Fall 5) An - 8 einer 30jährigen Patientin konnten bei vorsichtiger Präparation mit normaler Spraykühlung zwar oberflächliche Verbrennungen im Dentinbohrloch festgestellt werden und auch an einigen wenigen Stellen fanden sich Vakuolenbildungen im Odontoblastenbereich, sonst jedoch machte die Pulpa einen normalen gesunden Eindruck. In einem weiteren Fall unter gleichen Bedingungen wurde der Zahn erst nach 13 Tagen entfernt, wobei sich keinerlei Verbrennungserscheinungen mehr fanden; die Pulpa ist völlig unversehrt. Das Ergebnis ihrer histologischen Untersuchungen fassen die Autoren folgendermaßen zusammen:

Die histologischen Präparate deuten darauf hin, daß es gegenüber der Bohrstelle in gesunden Pulpen oft zu einem Verbrennungstrauma der Odontoblasten kommt, das auf Grund der Versuchsreihe nur im Augenblick des Bohrprozesses entstehen kann. Fraglos kann auch eine ausgedehntere Zerstörung der Odontoblasten eine Dauer-schädigung der Pulpa darstellen, zumal die Regenerationsfähigkeit einer solcherart traumatisierten Pulpa nicht abzuschätzen ist. In einigen Fällen zeigten sich außer einer Hyperämie der Gefäße sowie Rupturen derselben auch entzündliche Erscheinungen und Abszeßbildungen, die wohl eindeutig auf den Bohrprozeß zurückzuführen sein dürften. Bei vorschriftsmäßiger Technik wird die Pulpa jedoch wohl kaum eine Schädigung erfahren.

g) Benedikt Maeglin ²⁹ 1960:

Der Autor führt die durch höchsttourige Präparationen auftretenden Schädigungen an Dentin und Pulpa vor allem auf hohe Temperaturen zurück und hält die Anwendung von Wasserkühlung für unbedingt notwendig. Im weiteren Verlauf seiner Arbeit schreibt er: Die Erscheinungen großer Wärmeentwicklung beim höchsttourigen Bohren und Schleifen ohne spezielle Kuhlvorkehrungen können schon in den Hartsubstanzen festgestellt werden. Das Funkenschlagen beim Bearbeiten des Schmelzes, der Geruch nach verbranntem Horn und Brandspuren im Dentin sind eindeutig klinische Beweise für das Auftreten hoher Temperaturen am Ort der Bohreinwirkung. Im Dentin sind die Brandspuren auch histologisch nachzuweisen. Die ohne Kühlung und ohne Unterbrechung bearbeitete Kavitätenwand zeigt eine dünne verkohlte Schicht. Oft finden sich in der oberflächlichsten geschwarzten Dentinschicht lunkerartige, wie ausgestanzte Hohlräume. Die bei derartiger Kavitätenpräparation freigelegten Dentinkanälchen sind im Bereich der Verbrennungsspuren des Dentins leer. Die Odontoblastenfortsätze, von denen bei feuchter Präparation einzelne aus den Tubuli am Kavitätenboden deutlich sichtbar herausragen, sind offenbar unter dem Einfluß der Bohrhitze verbrannt.

Über Pulpenschädigungen berichtet Maeglin folgendes: Vom histologischen Standpunkt aus sind zwei voneinander verschiedene Reaktionen in der Pulpa zu unterscheiden:

- 1.) Primäre Veränderungen, die die unmittelbare Folge des Bohrtraumas darstellen. Sie sind sofort nach dem Präparieren extrahierter Zähne festzustellen.
- 2.) Sekundäre Veränderungen, die erst zu einem späteren Zeitpunkt auftreten und die als mittelbare Antwort des vitalen Gewebes auf die primären Veränderungen aufzufassen sind.

Es ist oft recht schwer, die beiden Arten der Veränderungen auseinanderzuhalten. Um als sichere Präparationsfolgen gewertet zu werden, müssen beide Arten klare topographische Beziehungen zur präparierten Kavität aufweisen.

Zu den Veränderungen, die als unmittelbare Folgen des Bohrtraumas zu beobachten sind, zählen wir die Verlagerung von Odontoblastenkernen in die Dentinkanälchen (Odontoblastenaspilation), die dadurch bedingte unscharfe Begrenzung oder das Fehlen der Odontoblastenschicht mit Unterbrechung der pulpodentinalen Membran und das Auftreten von hydropischen Hohlraumbildungen zwischen Praedentin und Odontoblastenschicht. Während die Kernverlagerungen bei Präparationen mit und ohne Wasserkühlung festzustellen sind, zeigt es sich, daß die Hydropsbildungen ganz charakteristische Veränderungen bei trockener Präparation darstellen. Als sekundäre Veränderungen sind alle Zeichen entzündlicher Reaktionen zu werten.

Der mildeste Ausdruck einer Entzündung ist das Hervortreten von Kapillaren in der geschädigten Odontoblastenschicht; meistens gesellt sich eine Infiltration mit Entzündungszellen hinzu, die sich entsprechend dem Ausmaß der Schädigung auch auf zentrale Pulpabezirke ausdehnen kann. Häufig finden sich in scheinbar nicht geschädigten Abschnitten der Odontoblasten und Weil'schen Schicht kleine Blutungsherde. Eigentliche Gewebdefekte als Folgen von Nekrosen können Anlaß zu Abszeßbildungen geben. Solche Abszesse lassen sich auch im Bereich hydropischer Höhlen nachweisen.

Eine sehr häufig zu beobachtende Veränderung stellt die Vakuolenbildung in der Odontoblastenschicht dar. Als schwere, die Pulpa gefährdende Veränderungen sind die ausgedehnten hydropischen Höhlen und die Abszeßbildungen zu betrachten. Untersuchungen über die Prognose solcher Schädigungen sind noch nicht abgeschlossen.

Auf Grund der Resultate der histologischen Auswertung von 19 Zähnen mit trockener Präparation und von 16 Zähnen mit feuchter Präparation bei Beobachtungszeiten von 0 - 28 Tagen lassen sich die folgenden zusammenfassenden Feststellungen machen:

- 1.) Bei trockener Präparation zeigen die Kavitätenwände in fünf Fällen Brandspuren. Diese Erscheinungen fehlen bei feuchter Präparation.
- 2.) Alle trocken präparierten Zähne weisen ausgedehnte und schwerere Schädigungen der Pulpa, fast ausnahmslos mit Hydropsbildungen und teilweise mit Abszeßbildungen auf.
- 3.) 12 der 16 feucht präparierten Zähne zeigen deutliche Pulpaveränderungen, wie Kernaspiration, Kapillarerweiterung in der Odontoblastenschicht und leukocytäre Infiltrate auf. In einem Fall ist es auch zu einer kleinen Hydropsbildung gekommen. Diese Veränderungen gesamt betrachtet, reichen indessen nicht an die Schäden der Fälle mit trockener Präparation heran.
- 4.) Die Schwere der Schädigung ist abhängig vom Durchmesser der Dentschicht zwischen Kavitätenboden und Pulpa; je näher der Kavitätenboden an die Pulpa heranreicht, um so schwerer sind die Veränderungen.
- 5.) Die von anderen Autoren gemachte Feststellung der sog. "rebound response", d. h. von Pulpaveränderungen, die nicht am Ort der Reizeinwirkung liegen, konnte nicht beobachtet werden.

Von besonderem Interesse ist natürlich das Verhalten der Pulpa auf lange Sicht. Vor allem ist von Bedeutung, ob die auch unter Wasserkühlung in frühen Stadien festzustellenden Veränderungen reversibel sind. Wir konnten bisher acht Zähne,

an denen in kariesfreien Kronenbezirken unter Wasserkühlung Kavitäten präpariert und mit Zinkoxyd-Eugenol-Unterlagen und Amalgamfüllungen versehen worden sind, mit Beobachtungszeiten von 9 - 11 Monaten histologisch untersuchen. Dabei waren in keinem Fall Residuen einer schweren Pulpaschädigung festzustellen. Am auffallendsten ist die strukturell unregelmäßige, teilweise osteodentinartige Beschaffenheit der Sekundärdentinbildungen aus der Reaktionsphase, die unmittelbar auf das Bohrtrauma folgte.

Als weitere Beobachtung ist die Reduktion der Odontoblastenschicht im Kavitätenbereich auf eine einzige Reihe zu nennen. Entzündliche Reaktionen sind in keinem der Präparate vorhanden. Degenerationserscheinungen wie Kalkeinlagerungen im Pulpengewebe zeigen "lokalisatorisch" und im Vergleich mit Kontrollzähnen keine sicheren Anhaltspunkte, die für einen Zusammenhang der Gewebsalterationen mit dem Bohrtrauma sprechen würden. Wenn auch acht Fälle noch kein abschließendes Urteil über die Spätfolgen von höchsttourigem Präparieren erlauben, so zeigen sie doch, daß für die Pulpa die Möglichkeit des Überdauerns des höchsttourigen Bohrtraumas bei Verwendung der Wasserkühlung durchaus besteht.

Wir können indessen anhand dieser Präparate nicht beweisen, daß allfällige Schädigungen in der Zwischenzeit ausgeheilt sind. Die Tatsache aber, daß trotz Wasserkühlung beim Präparieren Pulpaveränderungen zu finden sind, läßt sich wohl am ehesten auf technische Unvollkommenheiten im Kuhlssystem zurückführen; Falsche Einstellung der Wasserdüsen, kurzfristige Unterbrechungen in der kontinuierlichen Wasserzuführung und schließlich - vor allem bei Kuhlvorrichtungen mit nur einer Düse - die Behinderung des Sprayzutritts zur Bohrstelle durch die Zahnform und die Kavitätenränder. Es ist also bei Präparationsmaßnahmen mit Turbinen unbedingt eine gut funktionierende Wasserkuhleinrichtung zu fordern.

h) Charles F. Boucher und J. Matthews⁴ 1961:

Die Verfasser sind der Ansicht, daß nicht die Hitzeeinwirkung für Veränderungen an der Pulpa verantwortlich zu machen ist, denn Dentin sei ein schlechter Wärmeleiter und bevor die Wärme tiefer eindringen kann, ist sie schon durch die abfliegenden Splitter entfernt. Weiter haben die Turbinenbohrer nur sechs Schneiden, im Gegensatz zum Stahlbohrer mit acht Schneiden, und tragen so dazu bei, die Hitzeentstehung zu verringern. Auch das Abschneiden größerer Partikelchen von Zahnschubstanz durch den Turbinenbohrer bewirkt einen größeren Verbrauch der potentiellen Wärmeenergie. Zum Schluß führen die Autoren die von R. C. Vaughan und F. A. Peyton ermittelten Versuchsergebnisse an, daß nämlich die Wärmeentwicklung viel stärker vom aufgewendeten Druck als von der Umdrehungsgeschwindigkeit abhängt. Beim hochtourigen Bohren mit geringem Druck entsteht weniger Wärmepenetration als beim Bohren mit geringer Geschwindigkeit und starkem

Druck. Auch die "rebound response" sei durch Hitzeeinwirkung nicht zu erklären. Vielmehr seien die Veränderungen durchaus verständlich, wenn man berücksichtigt, daß beim Bohren und Schleifen ein chirurgischer Eingriff an einem Teil des Körpers ausgeführt wird und daß dieser Körperteil (der Zahn) in ähnlicher Weise auf Reize reagiert wie alle anderen Körperteile. Bei jedem chirurgischen Eingriff erwarten wir eine Wunde und eine Entzündung; diese sind sichtbar von kurzer Dauer und nicht besorgniserregend. Die Wunde heilt wieder. Warum sollten wir nicht auch ein Trauma der Pulpa erwarten, wenn wir im Dentin schneiden. Die Pulpa hat die gleiche Fähigkeit zur Heilung wie andere Körperteile; nach dem Eingriff wird sie ihre normale Funktion wieder gewinnen. Man kann also durchaus auf Wasserkühlung verzichten und man gewinnt einige Vorteile, wenn man nur mit Luftkühlung arbeitet (OP-Feld übersichtlich, dadurch präzisere Arbeit, keine Gefahr vorhanden, zuviel Hartsubstanz zu entfernen).

Um die Richtigkeit der hier vorgebrachten Ansichten zu beweisen, haben die Autoren eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt:

In Zähnen, deren Exaktion vorgesehen war, wurden MOD-Kavitäten in Lokalanästhesie präpariert, und zwar mit dem Luftstrom der Turbine als einzige Kühlung. Die Kavitäten wurden provisorisch mit Zinkoxyd-Eugenol, Phosphatzement oder Amalgam gefüllt. Die Extraktionen erfolgten nach 2 Stunden, 24 Stunden, einer Woche, zwei Wochen und vier Wochen. Dann wurden histologische Präparate angefertigt. Auch klinische Beobachtungen wurden in über 300 Fällen im Laufe von 1 1/2 Jahren durchgeführt. Kein Patient hatte Nachschmerzen.

Die histologischen Untersuchungen ergaben: Nach 24 Stunden ist eine Reaktion der Pulpa in der Nähe der angeschnittenen Dentinkanälchen zu erkennen; kleine Hämorrhagien der Kapillaren, Unterbrechung der Odontoblastenreihe. Die Odontoblasten waren oft verschattet durch rote Blutzellen. Gelegentlich, aber nicht regelmäßig, ist Aspiration einiger Odontoblasten zu finden. Das Rebound-Phänomen nach Bernier wurde nicht beobachtet. Bei einigen Zähnen war eine Unterbrechung der Odontoblastenreihe auch an anderen Stellen der Pulpa zu erkennen, aber meist, wenn sich ein größeres Blutkoagulum gebildet hatte. Es handelt sich wahrscheinlich nicht um eine Vibrations- oder Hitzeeinwirkung, sondern um eine Zirkulationsstörung. In späteren Stadien ist eine Infiltration phagozytischer Zellen charakteristisch (Entfernung der toten Zellen). Die Odontoblasten regenerieren sich und es wird irregulär sekundäres Dentin gebildet. Das sekundäre Dentin ist gewöhnlich basophil und kann als calciotraumatische Antwort gedeutet werden.

Auf Grund der Ergebnisse ihrer histologischen Untersuchungen kamen die Autoren zu folgender Beurteilung der Luftturbine bei Verwendung des Luftstromes als Kühlmittel:

Antworten der Pulpa auf Bohren sind ein normales Schutz-Phänomen, das sowohl bei niedrigen als bei hohen Geschwindigkeiten auftritt. Irreversible Schäden durch Hitzeeinwirkung treten nur in zu tiefen Kavitäten auf. Kariöses Dentin in der Tiefe soll deshalb mit Handinstrumenten entfernt werden. Beim Arbeiten mit der Turbine ist Wasserkühlung nicht notwendig. Luftkühlung ist ausreichend, wenn normale Vorsicht gebraucht wird.

i) M. Hunkirchen¹⁹ 1962:

Es wurden die Pulpenverhältnisse von gesunden Zähnen jugendlicher Patienten untersucht, die mit der Turbine präpariert worden waren und zwar mit und ohne Sprayanwendung. Um gegen die mechanisch-traumatische Schädigung eine vielleicht isoliert zu differenzierende thermische Noxe abgrenzen zu können, wurden auch solche Zähne untersucht, die einer lokalisierten Dentinüberhitzung durch Berühren des Kavitätenbodens mit einer glühenden Kauterspitze ausgesetzt waren.

Die Autorin berichtet zu obengenanntem Thema:

Auch nach unseren Erfahrungen zeigen viele Pulpen der mit der Turbine (mit oder ohne Spray) behandelten Zähne generell eine grobe vakuolare Degeneration der Odontoblasten, die sehr wahrscheinlich schon vorher bestanden hatte. Ebenso fanden sich bei den Präparationsmethoden im Pulpengewebe Hohlräume nach Art der sog. Pseudozysten (Euler¹⁹). Es bestand jedoch insofern ein Unterschied, als die durch die spraylose Präparation verursachte Hohlraumbildung deutlich größer war. Die in einem Fall sichtbare Pseudozyste ist mit großer Wahrscheinlichkeit traumatisch entstanden. Es finden sich nämlich in ihrer Nahe am Kammerdach Reste von Odontoblasten. Unterhalb des auch als Ödemblase anzusprechenden Hohlraumes ist die Pulpa ausgesprochen reticular-atrophisch. Die Gefäße sind erweitert und im Randgebiet gestaut. Innerhalb einer anderen Pseudocyste konnten wir schmale Bündel von Tomes'schen Fasern sehen, die offenbar durch den Spannungsdruck herausgerissen wurden. In dem von diesen Veränderungen betroffenen Pulpenabschnitt zeigten sich außer der Odontoblastenschädigung unterhalb dieser Zone eine Zellverdichtung mit einigen eingestreuten Granulocyten sowie Blutextravasate durch Kapillarwandschädigungen. In beiden Fällen, in denen die der Kavität am nächsten gelegenen Kronenpulpenanteile schwer geschädigt wurden, zeigen die Wurzelpulpen ein weitgehend normales Bild mit unversehrter Odontoblastenschicht. Selbst bei intensiver Sprayanwendung tritt eine Koagulation der Tomes'schen Fasern auf, das Dentin zeigt Verbrennungsspuren, wie sie von G. Rauber bei sämtlichen Präparationsmethoden im Höchstourenbereich gefunden wurden.

Bei den mit Kauter in Berührung gebrachten Zähnen, die im Schmelz mit Imperator-Diamanten unter Sprayanwendung und im Dentin mit langsamtourig laufenden Stahlbohrern präpariert wurden, fielen bandförmige Verbrennungszonen im

Dentin auf, sowie teils längs, teils quer zu den Dentinkanälchen verlaufende Spalten. Der Kauter hat offenbar hier eine Quellung des Dentins unter Verschlammung und Heraussprengen von Hartsubstanzteilchen bewirkt. Auch hier finden sich in der unterhalb der Kavität gelegenen Pulpazone hyperämisch gestaute und erweiterte Gefäße und Kapillaren, Diapedese per rhexin und kleine Hämorrhagien. Im Zentrum der Kronenpulpa lag eine Pseudocyste. Besonders hervorzuheben ist aber im betroffenen Pulpenbereich (diese Stelle steht durch die Dentinkanälchen mit der gekauterten Kavitätenstelle in unmittelbarem Zusammenhang) eine partielle Ablösung der Odontoblasten vom Praedentin. Die Zone ist außerdem durch Zellüberlagerungen verdeckt. Es handelt sich hier um Zellen, die aus der Pulpa ins Dentin gelangten, um sog. eingeschluckte Zellen oder "aspirated odontoblasts". Eine lokalisierte Ansammlung von Granulocyten, Histiocyten und Rundzellen ist in der Nähe zu sehen. Auch in diesem Fall ist eine retikuläre Atrophie zu beobachten, die wahrscheinlich schon vorher bestanden hat, wie die Pulpa eines nicht behandelten Zahnes zeigt, der zum Vergleich extrahiert wurde.

Ergebnisse:

Es zeigten sich Odontoblasten-Schädigungen entweder in Form einer vakuolären Degeneration oder als Karyorhexis und Karyolyse. Die unter den Zahnbeinbildnern gelegene Zone ist sowohl nach Anwendung der Turbine als des Kauters oft serös verquollen. Weiter zeigten sich Hyperämie, sowohl bei Behandlung mit als auch ohne Spray. Die Störung der Durchblutung ist oft so groß, daß Kapillarwandschäden auftreten, was besonders bei der Dentinüberhitzung durch den Kauter auffällt, mit den Folgeerscheinungen der Diapedese per rhexin, den Hämorrhagien und den stellenweise auftretenden Granulocyten-Ansammlungen. Ob Spray oder nicht, die Pulpen zeigten vielfach Pseudocysten. Ganz besonders groß waren diese bei Anwendung des Kauters. Die stärksten Veränderungen, nämlich die von vielen Autoren nach Turbinenbehandlung beobachteten aspirierten Odontoblasten, zeigten gemäß der Hitzeanwendung die gekauterten Zähne. Dies ist für uns der schlüssige Beweis für die schädigende Wirkung der Hitze auf das Zahnmark. In unseren Untersuchungen konnten für die Theorie der Ultraschallwirkung der sich in hochfrequenter Umdrehung befindlichen Bohrer keine Anhaltspunkte gefunden werden. Wir stellten ebenso wie Swerdlow und Stanley fest, daß die Veränderungen immer diejenigen Pulpenabschnitte betrafen, die durch ihre Tomes'schen Fasern und Dentinkanälchen im Zusammenhang mit der durch den Bohrer bedingten Dentinwunde standen. Eine Erklärung der gefundenen Veränderungen muß sich demnach den oben erwähnten Experimenten und ihren Ergebnissen anpassen.

Bei richtiger und vorsichtiger Handhabung (ausreichende Kühlung, tupfende Bohrweise) ist die Anwendung der zahnärztlichen Turbine durchaus zu empfehlen.

j) G. Rauber ⁴³ 1962:

Die mit Hämatoxylin-Eosin gefärbten Schnitte zeigen schon bei schwacher Vergrößerung eine dunklere Anfärbung des Dentins im Bereich der Kavitätenwände. Diese dunklere Schicht, die durchschnittlich 35 μ dick ist, verbreitert sich in der Gegend der Schmelz-Dentin-Grenze. Es war anzunehmen, daß einer der beiden Farbstoffe diesen Effekt verursacht. Die mit Eosin gefärbten Schnitte zeigen im bearbeiteten Zahnbein keinen Farbunterschied. Im Gegensatz weisen die mit Hämatoxylin behandelten Präparate den typischen dunklen Saum im Bereich der Kavitätenumrandung auf. Da diese Farbstoffe ein gewisses Selektionsvermögen über verschiedene p-H-Stufen besitzen, liegt es nahe, daß es hier zu einer eindeutigen p-H-Verschiebung im Dentin gekommen ist, und zwar zum sauren Bereich hin (p-H-Normalwert des Dentins : 7,85).

Bei starker Vergrößerung unterscheidet man in dieser veränderten Schicht zwei Zonen mit verschiedenen Eigenschaften:

- a) eine äußere, in der es nicht möglich ist, die Strukturen des Dentins zu verfolgen,
- b) eine innere, in der die Odontoblastenfortsätze erkennbar sind und die allmählich in den Normalzustand übergeht.

Die mit der PAS-Methode gefärbten Schnitte lassen in der veränderten Zone einen stärkeren positiven Ausfall vermuten. Da dies jedoch nicht der Fall ist, muß angenommen werden, daß die organischen Komplexe des Dentins eine Depolymerisation erfahren haben. Die Azanfärbung nach Heidenhain bestätigt diese Ansicht.

Bei unter Spraykühlung präparierten Kavitäten ist die veränderte Zone wesentlich geringer oder fehlt ganz. Wird nun mit einer Spraydüse gearbeitet, so beobachten wir wieder einen feinen Saum veränderten Gewebes, der sich an gewissen Stellen, z. B. der Schmelz-Dentin-Grenze und an den Winkeln zwischen Boden und Seitenwänden der Kavität vergrößert. Diese breiteren Zonen sind so zu erklären, daß hier wegen der Richtung des Sprays nicht genügende Mengen der Kühlflüssigkeit am Ort der Reibung wirksam werden. Bei Anwendung von zwei Spraydüsen verringert sich das veränderte Gebiet auf eine eben noch sichtbare Linie. Der schmale Saum ist unterbrochen, aber er ist noch nachzuweisen, wie auch Veränderungen größeren Ausmaßes, so an der Schmelz-Dentin-Grenze, am Boden und an den Seitenwänden der Kavität, wenn sich auch das veränderte Dentin quantitativ verringert hat. Dies ergibt sich aus der Stellung der beiden Spraydüsen, die jeder Kavitätenfläche ein Minimum an Kühlflüssigkeit zukommen lassen. Erst wenn mit drei Sprayöffnungen gearbeitet wird, sind keine Veränderungen mehr im Niveau der verschiedenen Kavitätenwände zu beobachten, weder mit den üblichen Verfahren noch mit der histochemischen Methode.

Die Diamantschleifer verursachen bei trockener Anwendung eine veränderte Zone größeren Ausmaßes mit den gleichen färberischen Besonderheiten wie bei mit Hartmetallbohrern hergestellten Kavitäten.

Weiter ist anzunehmen, daß die depolymerisierte Zahnhartsubstanz eine restitutio ad integrum nicht mehr erfährt, sondern daß sie sich wie üblich in toxische Abbauprodukte zersetzt. Diese Stoffe können durch die Permeabilität des Dentins auf das vitale Zahnbein und weiter in die Tiefe einwirken; auf diesem Weg können sie möglicherweise als Reizsubstanz eine Irritation der Pulpa mit verursachen. Die Hitzeeinwirkung hätte auf diese Weise nicht nur einen direkten Einfluß auf das Pulpengewebe, sondern auch eine indirekte Wirkung. Die Rolle, welche die veränderte Zone beim Kariesrezidiv und hinsichtlich des Widerstandes der Kavitätenwände gegenüber mechanischen Kräften spielt, ist noch ungeklärt.

Zusammenfassung:

Auf Grund der Untersuchungen und Ergebnisse oben aufgeführter Autoren ließen sich qualitativ folgende Veränderungen an Pulpa und Dentin nach Präparationen mit Luftturbinen ermitteln:

I. Veränderungen der Odontoblastenschicht

- 1.) Vakuolige Degeneration der Odontoblasten
- 2.) Hohlraumbildungen
 - a) zwischen Odontoblastenschicht und Praedentin
 - b) innerhalb der Odontoblastenschicht, zwischen den einzelnen Zellen
 - c) zwischen der Odontoblastenschicht und dem eigentlichen Pulpengewebe
- 3.) Kapillarveränderungen
(Dilatationen, Stauungen, Rupturen)
- 4.) Mikrohämorrhagien
- 5.) Verwaschene Strukturen und unscharfe Begrenzung
- 6.) Verlagerung von Odontoblastenkernen in die Dentinkanälchen
(*"aspirated odontoblasts"*)

Als Spätfolge:

- 7.) Reduzierung der Odontoblastenschicht meist auf eine einzige Zellreihe

II. Unterbrechung der pulpodentinalen Membran

III. Hohlraumbildungen im Pulpengewebe.

All diese Hohlraumbildungen, auch die unter I, 2 angeführten, werden von den einzelnen Autoren verschieden bezeichnet, z.B. von G. Fischer als Hydrops, von Swerdlow und Stanley als Abszeß, von Euler als Pseudocyste. Andere Autoren wie Hill, Nyborg sprechen von Vakuolen. Hier jedoch soll

die Einteilung nach Langeland verwendet werden, der die neutrale Bezeichnung "Hohlraumbildung" vorschlägt, den Begriff Vakuole jedoch nur auf Hohlraumbildungen innerhalb von Zellen selbst angewendet wissen will.

IV. Degenerative Veränderungen

(reticuläre Atrophie, fettige Degeneration, Kalkeinlagerungen, evtl. "rebound response")

V. Entzündliche Erscheinungen

- 1.) Veränderungen an den Gefäßen
(Dilatationen, Stauungen und Rupturen)
- 2.) Infiltrationszellen im Gewebe (Rundzellen, Leukocyten)
- 3.) Histiocytäre Reaktionen
- 4.) Mikrohämorrhagien
- 5.) Exsudate und ödematöse Durchtränkung des Gewebes

VI. Nekrosen

Am Dentin konnten folgende Veränderungen nachgewiesen werden:

- 1.) Verbrennung der oberflächlichen Schicht
- 2.) Sekundärdentinbildungen mit besonderer Struktur (osteodentinartig),
ist als calciotraumatic response im Sinne Bernier's zu werten

Ein genaues quantitatives Ergebnis der einzelnen Pulpenveränderungen zu ermitteln ist auf Grund der zum Teil unvollständigen Angaben der zu dieser Ermittlung notwendigen Werte, wie z.B. Zahl der Zähne, prozentuelles Auftreten der einzelnen Veränderungen usw. seitens der Autoren und auf Grund der verschiedenen Versuchsbedingungen (z.B. Kavitätentiefe, Beobachtungszeit, Versorgung der Kavität, Kühlung usw.) nicht möglich. Jedoch dürfte nach der von mir durchgeführten Auswertung die Schädigungsquote unter optimalen Versuchsbedingungen, d.h. also bestmögliche Kühlung, intermittierende Arbeitsweise, mittlere Kavitätentiefen usw., bei ungefähr 70 % liegen.

Die hierbei auftretenden Veränderungen sind meistens folgender Art:

- 1.) Odontoblastenkern-Aspiration
- 2.) Vakuolare Degeneration der Odontoblasten im Bereich des angeschnittenen Dentins
- 3.) Infiltrationszellen unter der Odontoblastenschicht.

In einigen Fällen kam es auch zur Hohlraumbildung trotz Wasserkühlung.

Bei Luftkühlung dagegen ist mit einer Schädigungsquote von nahezu 100 % zu rechnen. Außerdem nimmt auch die Schwere des Schädigungsgrades gegenüber bei Wasserkühlung ganz beträchtlich zu. Hier kommt es sehr häufig zu Entzündungserscheinungen und Hohlraumbildungen in der Pulpa selbst, außerdem zur

Verbrennung der oberflächlichen Dentinschicht.

Von allen Autoren wird daher Wasserkühlung gefordert, nur Boucher und Matthews⁴ halten auch die Luftkühlung für ausreichend.

Die Erscheinung der sog. "rebound response" im Sinne Bernier's² konnte nur von Mühlemann³⁴ bestätigt werden. Die calciotraumatic response dagegen wurde in sämtlichen Fällen über 14 Tage Beobachtungszeit gefunden.

Als vielleicht wichtigstes Ergebnis dieser Auswertung soll angeführt werden, daß die Pulpa doch eine wesentlich größere Widerstandskraft besitzt, als bisher vielfach angenommen wurde. Vor allen Dingen zwei Punkte veranlassen mich zu dieser Ansicht:

- 1.) Wurden mit Luftturbinen bearbeitete Zähne erst nach Beobachtungszeiten von 3 - 4 Wochen extrahiert, so wiesen oft die histologischen Präparate beträchtliche Veränderungen der Pulpa auf, trotzdem waren aber die Patienten über die ganze Zeit hin klinisch vollkommen beschwerdefrei. Vermutlich wäre es also hier über einen längeren Zeitraum hinweg zur Ausheilung gekommen.
- 2.) Die von Maeglin²⁹ mit dem Airtor unter Wasserkühlung behandelten acht Zähne wiesen nach Beobachtungszeiten von 9 - 11 Monaten in keinem Fall mehr Residuen einer schweren Pulpaschädigung auf. Auffallend war nur eine strukturell unregelmäßige osteodentinartige Beschaffenheit der Sekundärdentinbildung und die Reduktion der Odontoblastenschicht auf eine Reihe. Zähne dagegen, die unter gleichen Versuchsbedingungen nach einer Beobachtungszeit von 0 - 28 Tagen extrahiert wurden, wiesen im histologischen Bild deutlich erkennbare Veränderungen auf. Es muß also hier zu einer Reparation derselben gekommen sein. Diese meine oben geäußerte Ansicht fand ich auch vor allem bei Lisanti & Zander²⁸ (1952) sowie bei J. Kennedy, Buchmann & Proffit²² und Nygaard-Östby³⁸ bestätigt.

Erstere führten an hundert Hundezähnen in Vivo Wärmeversuche durch. Hierbei wurde an einem Zahn der Kavitätenboden einer Temperatur von 316 °C ausgesetzt. Trotzdem überlebte die Pulpa diese Schädigung. Nach ihrer Meinung kommt es zu einer Abgrenzung der wärmegeschädigten Pulpenteile von den ungeschädigten in ungefähr 21 - 30 Tagen und die Pulpa überlebt oft unter Bildung irregulären Sekundärdentins als Folge dieser Schädigung.

Die Autoren schließen deshalb auch, daß die Pulpa die durch Wärmeeinwirkung entstehenden entzündlichen Veränderungen beim Bohren ausheilen kann.

Kennedy, Buckman & Proffit²² berichten zu demselben Thema:

Die Pulpa wird heute für widerstandsfähiger gehalten gegenüber Schädigungen als man bisher glaubte. Die Meinung, daß die Pulpa unfähig ist, die entzündliche Reaktion zu überstehen, weil sie in die harte Zahnschubstanz eingeschlossen ist, steht im Begriff, sich zu ändern. Manche Autoren glauben heute, daß die lockere Anordnung der Zellen und Fasern in der Pulpa eine vorübergehende Ansammlung von Infiltrat ohne schwere Schädigung gestattet. Gleichzeitig dürfte die sehr reichliche Durchblutung der Pulpa helfen, die Wirkung der Hitzeschädigung zu verringern. Zweifellos trifft dies zumindest für jugendliche Pulpen zu.

Auch Nygaard-Östby³⁸ nahm hierzu Stellung. Er schreibt: Die umfassenden experimentellen Untersuchungen der letzten Zeit über die Verhältnisse der Pulpa bei Karies und bei Eingriffen und Implantation von Füllungsmaterialien in das Dentin (Nygaard-Östby, Langeland, Stanley & Swerdlow) haben die Auffassung von der Biologie der Pulpa im großen und ganzen verändert. Es ist durch dieselben gezeigt worden, daß der kariöse Prozeß im Dentin frühzeitig von ernstesten lokalen Entzündungsreaktionen begleitet sein kann. Aus den Untersuchungen darf auch geschlossen werden, daß die früher allgemein verwendete Trockenpräparation den pathologischen Zustand wesentlich verstärkte. Trotzdem überwiegt die Anzahl von vital verbliebenen Pulpen und histologische Untersuchungen von vielen Zähnen mit alten Füllungen haben eine Pulpa ohne Entzündungserscheinungen offenbart. Es kann daraus geschlossen werden, daß diese ein bis vor wenigen Jahren ungeahntes Heilungsvermögen besitzt.

Nach den Untersuchungsergebnissen oben angeführter Autoren und deren Auswertung scheint die Anwendung der Luftturbine, eine sachgemäße und vorsichtige Handhabung derselben vorausgesetzt, auch in biologisch-histologischer Hinsicht gerechtfertigt zu sein.

2.) Um einen Vergleich des höchsttourigen Bohrens unter Verwendung der Luftturbine mit anderen Drehzahlbereichen vor allem des hoch- und normaltourigen Bohrens, hinsichtlich Qualität und Quantität der auftretenden Pulpaveränderungen ziehen zu können, sollen nun Untersuchungen unten aufgeführter Autoren aus diesen Gebieten angegeben werden. Es muß aber schon jetzt betont werden, daß die zu dem Airotorverfahren gezogenen Parallelen nur bedingte Gültigkeit haben können, da zur Ermittlung exakter vergleichender Ergebnisse eine gemeinsame Vergleichsgrundlage notwendig ist. Diese ist aber nicht gegeben, da die Versuchsbedingungen und das Ziel der Ergebnisse der von verschiedenen Autoren durchgeführten Untersuchungen voneinander abweichen. Trotzdem wurde versucht, nur Gruppen von Zähnen hinsichtlich Qualität und Quantität der aufgetretenen Veränderungen miteinander zu vergleichen, bei denen wenigstens die wichtigsten für diese Veränderungen verantwortlichen Faktoren wie Kühlmethode, Abstand Kavitätenboden-Pulpa und Extraktionszeit übereinstimmten.

Folgende wichtige Untersuchungen wurden im Drehzahlbereich des hoch- und normaltourigen Bohrens durchgeführt:

a) J. Bernier und M. Knapp² führten neben Untersuchungen an Hundezähnen mit verschiedenen Handstücken bei ungefähr gleichem Abstand Kavitätenboden-Pulpa, um hier die Auswirkungen der einzelnen Instrumententypen ermitteln zu können, auch Untersuchungen an 6 kariesfreien Menschenzähnen durch. Diese Versuche wurden mit dem Page-Chayes-Handstück bei 100 000 U/min, und dem Turbo-Jet-Handstück bei 45 000 U/min, durchgeführt. Der Abstand Kavitätenboden-Pulpa wurde variabel gehalten (0 - 1 mm), um zu bestimmen, ob irgend ein Verhältnis zwischen genanntem Abstand und Pulpenveränderungen auf hohe Tourenzahlen besteht. Die Kavitäten wurden mit Amalgam verschlossen und die Zähne nach 2, 7 und 14 Tagen extrahiert. Die Versuche wurden unter Spraykühlung durchgeführt. Nur die Untersuchungen an den Menschenzähnen sollen hier aufgeführt werden, denn Ergebnisse aus Tierversuchen lassen sich nur bedingt auf den Menschen anwenden (Rautmann & Ritze, Zach & Brown).

Patient 1: 11 Jahre alt

Page-Chayes-Handstück (100 000 U/min)

Abstand Kavitätenboden-Pulpa : 0

Extraktion nach 2 Tagen

Histologischer Befund:

Die Pulpa wurde in diesem Versuch eröffnet. Es konnten in diesem Fall die unmittelbaren Auswirkungen einer auf mechanischem Weg geschaffenen Eröffnung als gleichwertig mit den Wirkungen einer tiefen Kavitätenpräparation gegenüber jeder anderen beobachtet werden. Das Pulpengewebe wies unmittelbar unter der Eröffnungsstelle einen großen umschriebenen Abszeß auf, der von Fibroblasten eingefaßt war: Entzündungszellen fanden sich bis tief in das Pulpengewebe hinein und die Odontoblastenschicht, die die Eröffnungsstelle umgab, war zerrissen und zeigte Degenerationserscheinungen. An der Stelle, wo die Kavität tief, aber die Pulpa nicht eröffnet war, fand sich ein in seiner Dicke verringertes Praedentin. Die Odontoblasten waren zerrissen und zerstört und eine diffuse Infiltration von Plasmazellen und Lymphocyten zeigte sich in der Pulpa.

Patient 2: 11 Jahre alt

Page-Chayes (100 000 U/min)

Abstand Kavitätenboden-Pulpa 1, 0 mm

Extraktion nach 7 Tagen

Histologischer Befund:

Die Praedentinlage unter dem Kavitätenboden war in ihrer Dicke reduziert oder vollkommen abwesend. Eine schwache Infiltration von Plasmazellen und Lympho-

cyten fand sich in der Zone unter den Odontoblasten an dieser Stelle. Die Entzündungsinfiltrate erstreckten sich entlang der Wände der Pulpenkammer fast bis zum mittleren Drittel des Wurzelkanals. Inmitten der Pulpa unter dem Kavitätenboden machte sich eine umschriebene, relativ zellfreie Zone, die ein Zentrum von sternförmigen Zellformen umgab, bemerkbar. Über derselben Zone war eine Verdichtung von ähnlichen Zellformen feststellbar.

Patient 3: 11 Jahre alt

Page-Chayes-Handstück (100 000 U/min)

Abstand Kavitätenboden-Pulpa 0,4 mm

Extraktion nach 14 Tagen

Histologischer Befund:

An der Pulpenoberfläche, gegenüber dem angeschnittenen Dentin, konnte eine calciotraumatische response beobachtet werden. An den gleichen Stellen hatte das Praedentin ein Kammuschel-Muster, welches auf die Irregularität in der Dentinbildung hinwies. Die Odontoblastenzone war abgeflacht und an einigen Stellen zerrissen, die Subodontoblastenzone war ödematos und von Plasmazellen und Lymphocyten infiltriert. Das Pulpengewebe unter den Odontoblasten an der Bohrstelle zeigte diffuse degenerative Veränderungen.

Patient 4: 38 Jahre alt

Turbo-Jet (45 000 U/min.)

Abstand Kavitätenboden-Pulpa 0,8 mm

Extraktion nach 2 Tagen

Histologischer Befund:

Unter dem Zentrum der Kavitätenpräparation zeigt sich die Odontoblastenschicht zerrissen. Ansonsten waren keine Veränderungen nach Angabe des Autors feststellbar.

Patient 5: 13 Jahre alt

Turbo-Jet (45 000 U/min.)

Abstand Kavitätenboden-Pulpa 1,0 mm

Extraktion nach 7 Tagen

Histologischer Befund:

Die Dicke des Praedentins gegenüber dem angeschnittenen Dentin war reduziert und die Subodontoblastenschicht ödematös verändert und mit Plasmazellen und Lymphocyten infiltriert.

Patient 6; 11 Jahre alt

Turbo-Jet (45 000 U/min.)

Abstand Kavitätenboden-Pulpa 0,4 mm

Extraktion nach 14 Tagen

Histologischer Befund:

Es zeigte sich unter dem Kavitätenboden eine calciotraumatic response und ein Fehlen von Praedentin an einer Stelle. An einigen Stellen konnten in der Odontoblastenschicht Auflösung, Ödeme und Infiltration von Plasmazellen und Lymphocyten beobachtet werden. Unmittelbar unter der tiefsten Stelle der Kavität war ein großer cystischer Raum zu finden, der teilweise von einem dünnen Band von homogenem eosinophylen Material begrenzt wurde. Das Pulpengewebe in einem Abstand von der Kavitätenpräparation zeigte eine umschriebene Stelle der Degeneration.

Ergebnis:

Die Schwere der Pulpenschädigung stand bei den Menschenzähnen in einem direkten Verhältnis zur Tiefe der Kavität. Folgende Veränderungen der Pulpa konnten an den drei mit dem Page-Chayes-Handstück (100 000 U/min.) unter Spraykühlung behandelten Zähnen festgestellt werden:

- | | |
|---|-------------|
| 1.) Vakuoläre Degeneration der Odontoblasten und
Zerreißen derselben | in 2 Fällen |
| 2.) Infiltrationszellen im Pulpengewebe | in 2 Fällen |
| 3.) Hohlraumbildung | in 1 Fall |
| 4.) Degenerative Veränderungen im Pulpengewebe
(rebound response) | in 2 Fällen |
| 5.) Ödematöses Durchdringen des Gewebes | in 2 Fällen |
| 6.) Reduzierung der Dicke der Praedentinschicht | in 2 Fällen |
| 7.) Als typische Spätfolgen bei dem Präparat
mit 14 Tagen Beobachtungszeit | |
| a) Reduzierung der Odontoblastenschicht | |
| b) Calciotraumatic response | |

Bei den 3 mit dem Turbo-Jet-Handstück unter Wasserkühlung (45 000 U/min.) behandelten Zähnen wurden folgende Veränderungen gefunden:

- | | |
|--|-------------|
| 1.) Zerreißen der Odontoblastenschicht | in 1 Fall |
| 2.) Infiltrationszellen im Pulpengewebe | in 2 Fällen |
| 3.) Hohlraumbildung | in 1 Fall |
| 4.) Degenerative Veränderungen im Pulpengewebe
(rebound response) | in 1 Fall |
| 5.) Ödematöse Durchdringung des Pulpengewebes | in 2 Fällen |

- 6.) Verringerung bzw. Fehlen der Praedentinschicht in 2 Fällen
 7.) Als Spätfolgen bei dem Präparat mit 14 Tagen
 Beobachtungszeit die calciotraumatic response

Die bei Behandlung mit dem Page-Chayes-Handstück (100 000 U/min.) als auch mit dem Turbo-Jet-Handstück aufgetretenen Veränderungen sind ganz beträchtlich. Der Schädigungsgrad dürfte bei den drei mit Page-Chayes behandelten Zähnen etwas schwerer sein als bei den Turbo-Jet-Zähnen.

Zieht man nun einen Vergleich dieser Ergebnisse mit den beim Airotor-Verfahren ermittelten, so findet man rein qualitativ die gleichen Veränderungen, der Schweregrad der Schädigung erscheint jedoch bei den Page-Chayes- und Turbo-Jet-Zähnen wesentlich stärker, da hier, um im Sinne Maeglin's zu sprechen, bereits an 4 von 6 Zähnen sog. sekundäre Veränderungen an der Pulpa vorliegen, d. h. schon zum Teil ausgedehnte entzündliche Veränderungen. Die Schädigungsquote betrug sowohl bei den Page-Chayes- als auch bei den Turbo-Jet-Zähnen 100 % im Gegensatz zu den Airotor-Zähnen mit 70 - 80 %.

b) M. Weder⁵⁶ führte neben den bereits oben erwähnten Versuchen mit der Luftturbine weitere Untersuchungen bei 80 000 U/min. und 40 000 U/min. durch. Es wurden entweder Kronenstumpfe oder MOD-Kavitäten präpariert. In allen Versuchen wurde die Zahnschubstanz ausschließlich durch Schleifen mit diamantierten Schleifern entfernt. Die Präparationen erfolgten schonend, leicht tupfend, ohne Druckanwendung. Alle Zähne wurden nach der Präparation provisorisch versorgt, je nach der Art der Präparation entweder mit fest angelutertem Fletcher-Zement oder mit Frasadhäsion bzw. Zinnkappen und Fletcher-Zement. Die Präparation erfolgte teils unter Anwendung von Spray, teils ohne Spray. Hier sollen jedoch nur die unter Spraykühlung durchgeführten Versuche berücksichtigt werden, d. h. also die unter normalen praxisnahen Bedingungen durchgeführt wurden. Die Extraktion der Zähne erfolgte in sämtlichen Fällen nach zwei Tagen.

Patient 1: 12 Jahre alt + 4

Kerrhandstück (80 000 U/min.)

Abstand Kavitätenboden-Pulpa 2,8 mm

Histologischer Befund:

Dentin: Keine Besonderheiten.

Praedentin: Das Praedentin ist regelmäßig ausgebildet und scharf begrenzt. Die Begrenzungslinie zwischen Pulpa und Dentin (pulpodentinale Membran) ist entsprechend den angeschnittenen Dentinkanälen unterbrochen.

Odontoblastenschicht: Die Odontoblastenschicht der Kronenpulpa ist je nach dem Grad des Beschleifens durchsetzt mit verschiedenen geformten Vakuolen von unterschiedlicher Größe. Unter den am stärksten beschliffenen Anteilen des Dentins fin-

det sich zwischen Praedentin und Odontoblastenschicht eine regelmäßige Vakuolenreihe. An anderen Stellen der Kronenpulpa liegen die Vakuolen zwischen den einzelnen Zellen. Die Zellen der Odontoblastenschicht, welche mit den angeschliffenen Dentinkanälen im Zusammenhang stehen, sind zahlenmäßig reduziert, unregelmäßig angeordnet und erscheinen geschrumpft. Die Odontoblastenschicht der übrigen Kronen- und Wurzelpulpa besteht aus regelmäßigen, ein- oder mehrreihig angeordneten, zylindrisch geformten Zellen.

Gefäße: Die Gefäßversorgung des Pulpengewebes ist sehr reichlich. Größere Kapillaren reichen bis in die Odontoblastenschicht der Kronenpulpa.

Übriges Gewebe: In 11 aufeinanderfolgenden Schnitten aus der Mitte des Zahnmарkes, die Kronen- und Wurzelpulpa enthalten, zeigt sich am Eingang des buccalen Wurzelkanals ein ausgedehnter Rundzellhaufen, der sich dann zu einem Hohlraum entwickelt. Gleichzeitig besteht an der äußeren Wand des lingualen Kronenpulpenhorns ein großer Hohlraum, dessen Genese - pathologisch oder Kunstprodukt - nicht eindeutig ist. Je weiter das Pulpengewebe sich im Verlauf der Schnitte vom Kavitätenboden entfernt, desto geringfügiger werden die patho-histologischen Veränderungen, vakuolige Durchsetzung der Odontoblastenschicht, Rundzelleninfiltrationen und Gefäßveränderungen. Dafür treten in den Wurzelpulpen große Dentikel und ausgedehnte Rundzellenhaufen auf. Bei stärkerer Vergrößerung aber ist das Pulpengewebe von verwaschener Struktur und ödematös verändert.

Patient 2: 9 Jahre alt + 4

Kerr-Handstück (80 000 U/min.)

Abstand Dentinoberfläche-Pulpa 2,5 mm

Histologischer Befund:

Dentin: Mit der Azanfärbung und auch mit der HE-Färbung sind in den Präparaten zahlreiche Odontoblastenkerne festzustellen, die in die angeschnittenen Dentinkanäle eingewandert sind.

Praedentin: Das Praedentin ist regelmäßig ausgebildet und scharf begrenzt, außer in den Spitzen des Pulpencavums und unterhalb der angeschnittenen Dentinkanäle.

Odontoblastenschicht: Entsprechend den angeschnittenen Dentinkanälen sind die Odontoblasten zahlenmäßig stark reduziert und von Vakuolen durchsetzt, besonders in den Pulpenhornspitzen. In der übrigen Pulpa ist die Odontoblastenschicht normal.

Gefäße: Die Gefäße sind zahlreich und zum großen Teil mit grünlich-braunem Inhalt gefüllt, in dem noch einige Zellen erhalten sind. Im Zentrum der Pulpa verlaufen die Gefäße dick und gewunden.

Übriges Gewebe: In allen Pulpenhörnern ist das Gewebe ödematös durchtrankt. Die Grundsubstanz ist stärker rosa gefärbt. Die Zellen darin sind nur undeutlich zu erkennen. Die Weil'sche Zone ist meist erhalten.

Patient 3; 50 Jahre alt - 8

Kerr-Handstück (80 000 U/min.)

Abstand Pulpa-Kavitätenboden an den dünnsten Stellen

4, 3 mm

Histologischer Befund:

Dentin: Über dem Pulpenkammerdach ist ein Streifen Dentin stärker angefärbt. Gleichzeitig ist der Verlauf der Dentinkanäle gestört. Im Dentin und Praedentin sind mehrere Einziehungen und Unregelmäßigkeiten zu beobachten, die mit dieser dunklen Linie im Zusammenhang stehen. In vielen Schnitten ist Sekundärdentin in den Pulpenhörnern abgelagert. In den azangefärbten Präparaten sind gewanderte Odontoblastenkerne in den angeschnittenen Dentinkanälen sichtbar.

Praedentin: Das Praedentin ist unregelmäßig und gewunden in seinem Verlauf. Am Pulpenkammerdach bildet es einen schmalen Saum.

Odontoblastenschicht: Die Odontoblastenschicht ist in der gesamten Pulpa mit unregelmäßigen Vakuolen durchsetzt. Eine regelrechte Odontoblastenschicht ist nicht vorhanden.

Gefäße: Die zahlreichen Gefäße scheinen in der Kronenpulpa erweitert zu sein. Zum Teil sind sie gefüllt mit grünlich-braunem homogenem Inhalt, in dem einige Zellen zu erkennen sind.

Übriges Gewebe: Das Pulpengewebe ist nicht sehr kraftig entwickelt, etwas atrophisch, weitmaschig und verhältnismäßig zellarm. Stellenweise haben ödematöse Veränderungen in der Kronenpulpa stattgefunden. Das Gewebe ist an diesen Stellen verwaschen und starker rosa gefärbt. In den mit der Azanfarbung gefärbten Präparaten sind die Veränderungen im Pulpengewebe auffällender. Das normalerweise blau gefärbte Bindegewebe ist hier in der Nähe der Odontoblastenschicht rot, ebenso die Exsudationen.

Folgende Pulpenveränderungen konnten an den 3 mit Kerr-Handstück (80 000 U/min.) unter Spraykühlung behandelten Zähnen festgestellt werden:

- | | |
|--|-----------------|
| 1.) Odontoblastenkerne in den Dentinkanälen | in 2 Fällen |
| 2.) Unterbrechung der Grenzlinie des Praedentins | in allen Fällen |
| 3.) Vakuolen in der Odontoblastenschicht | in 2 Fällen |
| 4.) Schrumpfung und Reduzierung der Odontoblasten | in 2 Fällen |
| 5.) Verwaschene Struktur und unscharfe Begrenzung der Odontoblastenschicht | in 2 Fällen |
| 6.) Hohlräume im Pulpengewebe | in 2 Fällen |
| 7.) Infiltrationszellen im Gewebe | in 1 Fall |
| 8.) Ödematöse Veränderungen | in allen Fällen |
| 9.) Dentinveränderungen | in 1 Fall |

Die histologischen Veränderungen dieser 3 untersuchten Zähne sind zweifellos als ausgeprägt zu betrachten.

Rein qualitativ finden sich wiederum dieselben Veränderungen wie bei den Airo-tor-Zähnen, der Schweregrad der Schädigung liegt aber hier ebenfalls höher, da wiederum in sämtlichen Fällen sekundäre Veränderungen an der Pulpa festzustellen sind. Der Schädigungsgrad dürfte ungefähr mit den von Bernier und Knapp ermittelten Ergebnissen übereinstimmen. Da sämtliche Zähne Veränderungen aufweisen, beträgt die Schädigungsquote 100 %.

Bei den 3 mit Imperator-Handstück und Schnellaufgelenkgleitverbindungen (40 000 U/min.) unter Anwendung von Spray behandelten Zähnen ließen sich folgende histologischen Befunde feststellen:

Patient 1: 16 Jahre alt 4 +

Imperator-Handstück + Gleitverbindung (40 000 U/min.)

Abstand Kavitätenboden-Pulpa 4, 8 mm

Histologischer Befund:

Dentin: Im Verlauf der Kronenpulpa ist angrenzend an das Praedentin eine dunkel angefärbte Zone im Dentin entstanden, in deren Verlauf die Dentinkanäle unregelmäßig werden.

Praedentin: Das Praedentin ist regelmäßig ausgebildet und scharf begrenzt. Unter den beschliffenen Dentinkanälchen ist die Begrenzungsmembran zwischen Pulpa und Praedentin unterbrochen. In den Spitzen der Pulpenhörner ist das Praedentin verwaschen oder es fehlt.

Odontoblastenschicht: Die Odontoblastenschicht der Kronenpulpa ist vakuolig verändert.

Gefäße: Die Gefäße der Kronenpulpa sind sehr zahlreich und unter den beschliffenen Dentinkanälen gequollen. Es zeigt sich das Bild der Hyperämie, weiter finden sich Infiltrationszellen im Gewebe.

Übriges Gewebe: Das Pulpengewebe ist gefäß und faserreich, die Gewebeschnitte unterhalb der Kavitätenpräparation sind hyperämisch und ödematös verändert.

Patient 2: 16 Jahre alt - 2

Imperator-Handstück + Gleitverbindung (40 000 U/min)

Abstand Dentinoberfläche-Pulpa 1, 9 mm

Histologischer Befund:

Dentin: Im Dentin der Kronenpulpa haben starke calciotraumatische Veränderungen stattgefunden. In den azangefärbten Präparaten sind Odontoblastenkerne festzustellen, die in die angeschliffenen Dentinkanäle eingewandert sind.

Praedentin: Das Praedentin ist in der Kronenpulpa kaum vorhanden.

Odontoblastenschicht: Die Odontoblastenschicht ist in der ganzen Pulpa nur schwach entwickelt und in der Kronenpulpa vakuolig verändert.

Gefäße: Die zahlreichen Gefäße scheinen in der Kronenpulpa gebläht und gequollen.

Übriges Gewebe: In der Spitze des Pulpenkavums ist das Pulpengewebe, dessen Struktur nicht deutlich zu erkennen ist, zwischen dem abgelosten, veränderten Dentin eingeschlossen und zusammengepreßt. Bei starkerer Vergrößerung sind in dem ödematös veränderten Pulpengewebe keine Einzelheiten zu erkennen.

Patient 3; 54 Jahre alt + 5

Imperator-Handstück + Gleitverbindung (40 000 U/min.)

Abstand Kavitätenboden-Pulpa 2, 8 mm

Histologischer Befund:

Dentin: In den Pulpenhörnern hat Sekundärdentin-Ablagerung stattgefunden. Im Verlauf der Kronenpulpa zieht sich eine dunkel angefarbte Linie dicht am Praedentin entlang. Die auf diesen Streifen aufstoßenden Dentinkanäle werden unregelmäßig. In den azangefärbten Präparaten sind Odontoblastenkerne festzustellen, die in die Dentinkanäle eingewandert sind. Man kann sie z. T. durch das Sekundärdentin hindurch bis ins Dentin verfolgen.

Praedentin: Das Praedentin ist regelmäßig ausgebildet und scharf begrenzt, außer in der Kronenpulpa.

Odontoblastenschicht: In der Kronenpulpa ist die Odontoblastenschicht vakuolig verändert, in der übrigen Pulpa normal. In den Pulpenhörnern sind die Zellen zahlenmäßig reduziert und geschrumpft.

Gefäße: Die Gefäße scheinen vermehrt. In den Pulpenhörnern haben jeweils entsprechend den angeschnittenen Dentinkanälen Erythrozytenaustritte aus den Gefäßen ins umliegende Gewebe stattgefunden.

Übriges Gewebe: Das Gewebe der Pulpenhörner ist zellarm und faserreich. Das übrige Pulpengewebe ist normal.

Nach den Untersuchungen von M. Weder⁵⁶ konnten folgende Pulpen-Veränderungen an den 3 mit Imperator-Handstück + Gelenkgleitverbindung unter Spraykühlung behandelten Zähnen festgestellt werden:

- | | |
|--|-------------|
| 1.) Odontoblastenkerne in den Dentinkanälen | in 2 Fällen |
| 2.) Unterbrechung der Grenzlinie des Praedentins | in 2 Fällen |
| 3.) Vakuolen in der Odontoblastenschicht | in 3 Fällen |
| 4.) Reduzierung und Schrumpfung der Odontoblasten | in 2 Fällen |
| 5.) Verwaschene Struktur und unscharfe Begrenzung der Odontoblastenschicht | in 2 Fällen |

6.) Ausgeprägte Hohlraumbildung	in 1 Fall
7.) Infiltrationszellen im Gewebe	in 1 Fall
8.) Ödematöse Veränderungen	in 2 Fällen
9.) Erythrocytenaustritt	in 1 Fall
10.) Starke Dentinveränderungen	in 1 Fall

Die bei Anwendung des Imperatorhandstückes + Gelenkgleitverbindung unter Spraykühlung auftretenden Veränderungen bei 40 000 U/min. sind zwar geringer als die bei 100 000 U/min. (Page-Chayes) und 80 000 U/min. (Kerrhandstück) ermittelten und dürften ungefähr vergleichbar sein mit den bei 45 000 U/min. (Turbo-Jet) ermittelten. Mit den Airtor-Zähnen verglichen scheinen die Veränderungen jedoch in der vorliegenden Versuchsreihe schwerwiegender, zumal noch Dentinzwischen-schichten von 4, 8, 2, 8 und 1, 9 vorhanden waren. Zu berücksichtigen allerdings ist sowohl bei den Versuchen von Bernier und Knapp ² als auch bei den von Weder ⁵⁶ durchgeführten, daß zur Entfernung der Zahnhartsubstanzen Diamantsteine verwendet wurden, die durch größere Wärmeentwicklung stärkere Reaktionen hervorrufen. (Walser ⁵⁴, Stüben und Hoppe ⁴⁵, Hoffmann ¹⁸). Die Schädigungsquote betrug hier ebenfalls wieder 100 %.

c) Kaare Langeland ²⁶:

Zu seinen Untersuchungen verwandte Langeland ⁴⁷ Praemolaren von Jugendlichen im Alter zwischen 9 - 14 Jahren. Von diesen Zähnen wurden 32 mit der Ritter-Bohrmaschine bei 6 000 U/min. und 15 mit dem Dentalair-Gerät (50 000 U/min.) behandelt. In einigen Fällen wurde die Präparation unter einem konstanten Wasserstrom durchgeführt, in anderen Fällen wurden 0, 9 % Na Cl oder Wasser-Spray zur Kühlung angewandt. Weiter kam in einigen Fällen ein stetiger Luftstrom zur Anwendung oder die Kavitäten wurden unter Speichelzufluß präpariert. Der Schmelz wurde mit Diamantsteinen abgetragen und das Dentin je nach Tourenzahl mit normalem Stahlbohrer oder Wolframcarbidbohrer bearbeitet. Nach Beobachtungszeiten von 4 - 20 Minuten wurden sämtliche Zähne extrahiert. In der Auswertung der Schnitte wurde die Betonung auf die Veränderungen an den Stellen der Odontoblastenschicht, die den angeschnittenen Tubuli gegenüberlagen, gelegt. Der Abstand Kavitätenboden-Pulpa betrug zwischen 0, 25 mm - 2, 8 mm.

Eine Beschreibung wird nun von den Fällen 82 und 83, die von dem gleichen Patienten stammen, gegeben, da diese typische Beispiele für die Wirkung einer trockenen und nassen Kavitätenpräparation darstellen. Diese beiden Zähne wurden bei 6 000 U/min. mit der Ritter-Bohrmaschine präpariert, der Fall 82 unter konstantem Luftstrom, der Fall 83 unter konstantem Wasserstrom. Der Abstand zwischen dem Boden der Kavität und der Pulpa war bei ersterem 1, 4 mm, bei letzterem 1, 5 mm. In beiden Fällen konnte kein Speichel die Kavitäten befeuchten. Nach der Kavitätenpräparation wurde ein mit Wasser getränktes Wattepellet in die Kavität des Fal-

les 83 gelegt. Nach 10 Minuten wurden die Zähne extrahiert.

Histologischer Befund:

Die Schnitte von dem Zahn, der unter konstantem Luftstrom präpariert wurde, zeigten zwei Stellen unter der Kavität, die frei von Odontoblasten waren. In den diesen Stellen benachbarten Dentintubuli konnten mehrere langliche Körper gesehen werden, die eine Kernfärbung bei Hamatoxylin-Eosin, bei Azan und wenn nach Masson gefärbt wurde, annahmen. Die Grundsubstanz enthielt einige Risse, aber leere Räume waren nicht vorhanden. Das histologische Bild erinnert daran, daß die oben beschriebenen dunklen Körper an mehreren Zähnen unter der von der Extraktionszange zurückgelassenen Marke beobachtet werden konnten. Bei diesem Versuch lagen sie ebenfalls unter der Marke der Extraktionszange.

Die Gefäße, die von und zu der Reaktionsstelle führten, waren erweitert und mit Erythrocyten gefüllt. Im Fall 83, wo der Zahn unter einem konstanten Strom von lauwarmem Wasser präpariert wurde, konnte keine von diesen Veränderungen festgestellt werden. Ebenso verhielt es sich bei Anwendung von Spray.

Weiter war es möglich, eine Kavität mit einem Abstand Kavitätenboden-Pulpa von nur 0,3 mm zu präparieren, ohne dabei Odontoblastenveränderungen hervorzurufen. Sorgfältige Präparation bei freiem Speichelfluß, aber ohne Kühlung irgendeiner Art, verursachte Odontoblastenveränderungen gleich jenen, die nach der Präparation unter einem konstanten Luftstrom beobachtet werden konnten, wobei allerdings die Zahl der betroffenen Odontoblasten viel geringer war.

Die Anwendung von Druck während der Präparation ohne Kühlung wirkte sich auf eine ungewöhnlich große Zahl von Odontoblasten an der Stelle unter der Kavität aus, auch wenn die Kavität flach war. Die Reaktionen auf High-Speed mit dem Dentalairgerät (50 000 U/min.) waren im wesentlichen die gleichen, wie jene nach der Präparation mit der gewöhnlichen Ritter-Bohrmaschine. Auch bei den unter gleichen Bedingungen mit der Luftturbine präparierten Versuchszähnen konnte Langeland keine wesentlichen Unterschiede zu denen mit 50 000 U/min. und 6 000 U/min. finden.

Ein Vergleich jedoch dieser Versuchsergebnisse mit denen von Schepers und meinen eigenen - wobei hier nur die Zähne, die ebenfalls kurz nach dem Anbohren extrahiert wurden, in Betracht gezogen werden können - läßt erkennen, daß der Schadigungsgrad bei den Airtor-behandelten Zähnen größer ist. Es ist zwar zu bemerken, daß bei diesen der Abstand Kavitätenboden-Pulpa äußerst gering ist (0,1 - 0,5 mm), während in den hier von Langeland beschriebenen Versuchen dieser Abstand 1,4 mm und 1,5 mm betrug. Langeland berichtet aber, daß es auch möglich war, bis zu 0,3 mm an die Pulpa heranzubohren, ohne Veränderungen in der Odontoblastenschicht hervorzurufen. Dies dürfte bei Verwendung der

Luftturbine, wie die eigenen Versuche zeigen, nicht mehr möglich sein. Man muß also hier wiederum betonen, daß die Luftturbine im pulpennahen Dentin eben nicht mehr indiziert ist.

Die von Langeland bei 50 000 U/min. (Dentalair) und 6 000 U/min. bei Verwendung von Bohrern unter Spray- und Wasserkühlung ermittelten Ergebnisse sind in Pulpennähe als geringer zu bewerten als die von Schepers und in eigenen Untersuchungen gefundenen.

Bei einer größeren Dentinzwischen-schicht jedoch dürften die Airotorpulpen geringere Veränderungen aufweisen als die Pulpen von Zähnen, die mit niederen Touren bearbeitet wurden.

d) Swerdlow & Stanley ⁴⁷ (1958):

An 60 nicht kariösen vitalen Zähnen von 9 Patienten im Alter von 27 - 47 Jahren wurden tiefe Kavitäten der Klasse 5 mit einem umgekehrten konischen Diamanten bei 20 000 U/min. präpariert. Die Präparationszeit betrug 19 - 90 Sek. 33 Präparationen wurden mit Spray und mäßigem Bohrdruck durchgeführt, 27 Präparationen ohne Spray und geringstem Bohrdruck. Die Zähne wurden während der Präparation mit Wasser gekühlt, dann die Kavitäten luftgetrocknet. Diese wurden mit ZnO-Eugenol gefüllt. Die Beobachtungszeit betrug 1 Std. - 36 Tage.

Ergebnis:

An allen Zähnen, die nach 24 Std. extrahiert wurden, konnten Pulpenschäden beobachtet werden. Die Entzündungserscheinungen an den mit Spray behandelten Zähnen waren auf das Gebiet unter den angeschnittenen Dentinkanälchen begrenzt. Ausgebreitete Schäden und Abszeßbildungen konnten in drei Fällen, die ohne Spray behandelt wurden, beobachtet werden. Bei Sprayanwendung war die Heilungstendenz günstiger und die Pulpenschäden bei minimalem Abstand Kavitätenboden-Pulpa geringer.

Auch bei diesen Versuchen mit 20 000 U/min. unter Spraykühlung waren qualitativ sämtliche Veränderungen vorhanden, wie wir sie auch bei Airotor-Pulpen fanden, von der Vakuolenbildung der Odontoblasten bis zu entzündlichen Veränderungen. Hohlraumbildungen waren allerdings in 3 Fällen nur ohne Sprayanwendung zu finden. Die Schädigungsquote jedoch beträgt auch bei den mit Spray behandelten Zähnen 100 % im Gegensatz zu 80 % beim Airotor-Verfahren.

Der Schwerdegrad der Schädigung dürfte jedoch unter demselben liegen, den die Airotor-Pulpen unter ähnlichen Versuchsbedingungen aufweisen.

e) Auch Mühlemann ³⁴ führte Untersuchungen bei 20 000 U/min. an 6 Zähnen durch. Es wurden möglichst tiefe bucco-cervikale Kavitäten unter Verwendung

eines Hartmetallbohrers 1,3 mm Ø angelegt. Auch er kam zu dem Ergebnis: Die Pulpen der mit 20 000 U/min. behandelten Zähne waren meistens weniger geschädigt als die Airtor-Pulpen.

f) Marsland und Shovelton ³⁰ (1957):

An 19 kariesfreien permanenten Zähnen wurden Präparationen mit dem Wolfram-Carbidbohrer unter leichtem Druck durchgeführt.

14 Präparationen wurden mit Tourenzahlen unterhalb 5 000 U/min., 5 mit Drehzahlen zwischen 5 000 - 15 000 ohne Kühlung durchgeführt. Die Extraktion erfolgte unmittelbar darauf.

Folgende Veränderungen an der Pulpa konnten nachgewiesen werden:

Tabelle 1

Drehzahl/ min.	Anzahl der Zähne	Leichte Vakuolen- bildung	Aspiration von Odonto- blasten- kernen	Koagu- lierung	Blutungen in der Odonto- blasten- schicht	größere Vakuolen- bildungen
unterhalb 5000 U/min.	14	9 (64 %)	10 (70 %)	5 (36 %)	3 (21 %)	1 (7 %)
5 000 - 15 000 U/min.	5	3 (60 %)	5 (100 %)	3 (60 %)	1 (20 %)	2 (40 %)

Bei 4 000 U/min. fand sich in dem einen Fall ein vollkommen zerstörtes Pulpenhorn mit einer akuten lokalen Entzündung in der Pulpa, die ganz hyperämisch war. Trotzdem fanden sich keine klinischen Beschwerden. Bei Kavitätenpräparation mit 5 000 U/min. und gleichzeitiger Kühlung mit mehreren von den bekannten Kühlungsmethoden Luft, Wasser, Spray, die in der Praxis Anwendung finden, kamen nur sehr kleine Pulpenschädigungen vor, egal welchen Bohrertyp oder welche Kühlungsmethode man verwandte.

g) M. Hunkirchen ¹⁹ (1956):

Neben den bereits erwähnten Untersuchungen über die Auswirkungen der Turbine auf die Pulpa wurden auch aus Vergleichsgründen Zähne normaltourig mit Hartstahlbohrern und forcierter Druckanwendung ohne Kühlung bearbeitet.

Histologischer Befund:

Das Dentin zeigte keinerlei Verbrennungsprozesse. Doch auch hier fanden sich wieder vakuolige Degenerationen, Karyorhexis sowie Karyolyse der Odontoblasten. Die Kronenpulpa ist in einem Fall diffus hyperämisch und im Pulpenhorn serös durchtränkt. Die bandförmige seröse Verquellung des Pulpenhornes greift auf die Weil'sche Zone und ihre Nachbarschaft im Bereich des Daches und der oberen Randpartien über. Auf der von der Kavität abgelegenen Seite des Pulpenhornes blieb die normale Konfiguration des Odontoblastensaumes erhalten.

h) G. Rauber ⁴³ 1962:

Auch dieser Autor berichtet, daß bei Verwendung von Stahlbohrern unter 6 000 U/min, weder bei trockener noch bei feuchter Arbeitsweise eine Veränderung des Dentins festgestellt werden konnte. Dagegen zeigten Diamantschleifkörper, die bei 6 000 U/min, benützt worden waren, im Dentin wiederum die veränderte Zone an allen Kavitätenwänden. Unter Einsatz von Spraykühlung reduziert sich die veränderte Zone bis auf einen feinen Saum, der teilweise unterbrochen ist. Erst bei Präparationen unter Wasserberieselung konnte in keinem Fall irgendeine Veränderung gefunden werden.

i) Eigener Versuch:

Bei einer 16jährigen Patientin wurde + 4 von occlusal mit der gewöhnlichen Emda-Bohrmaschine (6 000 U/min.) unter erhöhtem Druck und ohne Kühlung mit einem Stahlrosenbohrer Nr. 3 angebohrt. Dies erfolgte unter Injektion (Xyl. -N). Nach 10 Minuten wurde der Zahn extrahiert. Der Abstand Kavitätenboden-Pulpa betrug 0,3 mm.

Histologischer Befund:

Die Odontoblasten sind im Bereich des Defektes blasenförmig abgehoben. In der weiteren Umgebung weisen sie Vakuolen auf. Vereinzelt ist ein Eindringen von Odontoblastenkernen in die Dentinkanälchen zu beobachten. Die Kronenpulpa weist starke Gefäßerweiterung auf. Dort, wo die Odontoblasten sich blasenförmig abgehoben haben vom Dentin, erkennen wir vereinzelt Blutungsherde.

Auch die hier über das normaltourige Bohren aufgeführten Untersuchungen (Marsland & Shovelton ³⁰, Hunkirchen ¹⁹, eigener Versuch) zeigen, daß auch in diesem Drehzahl-Bereich rein qualitativ sämtliche Veränderungen an der Pulpa auftreten können, wie wir sie schon an Airtorpulpen gesehen haben.

Die Schädigungsquote beträgt im normaltourigen Bereich 100 %, da wiederum sämtliche Zähne Veränderungen aufwiesen.

Der Schweregrad der Schädigung beim normaltourigen Bohren dürfte jedoch im pulpenahen Dentin, bei drucklosem Arbeiten unter Spraykühlung, geringer sein als dies beim Airtor-Verfahren der Fall ist. Im pulpenfernen Dentin dagegen, wo meistens ohne Kühlung unter großem Druck gebohrt wird, scheinen die Veränderungen an der Pulpa größer als beim Airtor-Verfahren zu sein.

Nach reichlichem Studium der entsprechenden Literatur und Auswertung der hier angeführten vergleichenden Ergebnisse zwischen Reaktionen der Pulpa auf Airtor-Behandlung und solchen auf Präparationen in kleineren Drehzahlbereichen komme ich zu folgendem Resultat:

Die Veränderungen der Airtor-Pulpen sind geringer als die auf Präparationen in sämtlichen anderen Drehzahlbereichen, wenn eine genügend starke Dentinschicht zwischen Pulpa und Kavitätenboden zurückbleibt. In Pulpennahe dagegen wirken sich Tourenzahlen bis 20 000 U/min. unter geringem Druck und Spraykühlung am günstigsten aus. Die stärksten Pulpenreaktionen fanden sich auf Tourenzahlen von 40 000 U/min. an aufwärts, die von maschinengetriebenen Instrumenten mit großer Durchzugskraft erzeugt wurden.

Erklärung:

Im pulpenahen Dentin wirkt sich die Luftturbine wahrscheinlich deshalb schädlicher aus, weil hier punktförmig an der Berührungsstelle zwischen Bohrer und Dentin größte Temperaturen entstehen. Diese Temperaturen werden größtenteils durch das rasche Vordringen des Bohrers mit den abfliegenden Spanen beseitigt, nur der kleinere Teil durch Kühlung. Wird nun die Turbine abgesetzt, so wird die zuletzt entstehende Temperatur zum größten Teil im Dentin zurückbleiben. Ist dies in Pulpennahe der Fall, so treten zweifellos Hitzeschädigungen in der Pulpa auf; ist dagegen noch eine genügend starke Dentinzwischen-schicht vorhanden - das Dentin stellt ja einen schlechten Wärmeleiter dar - so wird diese punktförmig entstandene Temperatur nur in abgeschwächtem Maße auf die Pulpa einwirken, ohne eine Schädigung derselben hervorzurufen. Bei Touren ab 40 000 aufwärts, die durch maschinengetriebene Geräte erzeugt werden, durften zwar die im Dentin entstandenen Temperaturen normalerweise nicht so groß sein als bei Turbinen-anwendung, doch da diese Geräte eine größere Durchzugskraft aufweisen, wird meistens unter verstärktem Druck gearbeitet. Das hat dann Temperaturen, die noch höher liegen als bei den Airtor-Zähnen und damit auch stärkere Pulpenreaktionen zur Folge.

Nach Vaughan und Peyton⁴⁰ steigt ja die Wärmeentwicklung bei Druckerhöhung schneller als bei Erhöhung der Tourenzahl.

Günstiger als beim normaltourigen Bohren wird sich die Turbine im pulpenfernen Dentin deshalb auswirken, da hier die entstehende Temperatur für die Pulpa un-

schädlich ist, andererseits aber die mechanische Traumasetzung durch glattes Abschneiden der Zahnschubstanz wesentlich günstiger verläuft als im normaltourigen Bereich.

Hinzu kommt noch das vibrationslose Arbeiten mit der Turbine.

Dagegen in Pulpennähe sind die normaltourigen Drehzahlbereiche deshalb vorzuziehen, weil hier mit zusätzlicher Spraykühlung die Wärmeentwicklung bei relativ drucklosem Arbeiten vollkommen zu beherrschen ist, vorausgesetzt, es werden Bohrer verwendet. Besonders günstig wegen ihrer geringen Wärmeentwicklung (Larson) erweisen sich auch hier die Wolframcarbid-Hartmetallbohrer.

j) Im Rahmen dieser vergleichenden Untersuchungen soll hier noch die Arbeit von H. R. Stanley und H. Swerdlow ⁴⁹ (1959) angeführt werden, in der die Reaktionen der menschlichen Pulpa auf acht verschiedene Bohrtechniken verglichen werden. Das Ziel ist, eine Präparationstechnik zu ermitteln durch Kombinationen verschiedener Faktoren wie Bohrgeräte, Kühlungsarten, Drehzahlen, die eine minimale Pulpenreaktion hervorruft. Die Tourenzahlen reichen von 6 000 U/min. bei Verwendung des konventionellen kugelgelagerten Handstückes bis über 200 000 U/min., wenn das Turbinenprinzip Anwendung findet. Die Schneidinstrumente bestanden aus umgekehrt konischen Diamantsteinen Nr. 37 Ø 1,5 mm, Nr. 36 Ø 1,3 mm und einem umgekehrt konischen Karbid-Bohrer Nr. 35 Ø 0,9 mm mit glattem und konventionellem Griff. Die Kühlmethoden, wenn angewandt, bestanden aus einem Luft-Wasserspray, Wasser oder einem Luftstrahl.

Um eine Ausgangslinie für die vergleichenden Untersuchungen zu errichten, wurden die Präparationen an 450 intakten gesunden Zähnen ausgeführt. Sie wurden nach Kategorien, entsprechend den Drehzahlen, dem Typ des Handstückes und der benutzten Kühlmethode eingeteilt. Klasse V Kavitäten wurden gingival an den facialen Flächen der Zähne unter kontinuierlichem Bohren, wenn eine Kühlung benutzt wurde, und unter intermittierendem Bohren, wenn keine Kühlung oder der Luftstrom benutzt wurde, angelegt. Die Tiefe und die Umrißform wurden für jeden morphologischen Typ eines Zahnes ähnlich gehalten. Die Zähne wurden im OK unter Lokalanästhesie, im UK unter Leitungsanästhesie präpariert. Wenn kein Spray Anwendung fand, wurden die Präparationen mehrere Male während des Eingriffs mit Wasser benetzt, um den Bohrstaub zu entfernen. Die Kavitäten wurden schließlich luftgetrocknet und mit Zinkoxyd-Eugenol gefüllt. Die Zähne wurden unter allgemeiner Narkose im Abstand von weniger als einer Stunde bis zu 132 Tagen in allen Kategorien entfernt, außer in der 20 000 U/min. Nr. 37 Diamantstein-Kategorie, wo Lokalanästhesie benutzt wurde. Die Extraktion wurde durch chirurgisches Aufklappen mit sorgsamem Anlegen der Zange an der Wurzel durchgeführt. Obwohl das Alter der Patienten von 25 - 58 Jahren reichte, war das Durchschnittsalter in jeder Kategorie ziemlich gleich, nämlich 36,9 - 41,0. Es

bestand also eine Spannweite von weniger als 5 Jahren.

Histopathologische Störungen der Pulpa wie intrazelluläre Odontoblastenvakuolisation, verstreute punktförmige Blutungen, eosinophile Zonen, erweiterte hyperämische Gefäße werden in der folgenden Tabelle nicht berücksichtigt. Nur zuverlässige, histologische Befunde, welche klar von fragwürdigen pathologischen Veränderungen unterschieden werden können, die möglicherweise von selbstauflösenden Prozessen, chirurgischen Traumen, Lokalanästhetika oder Kunstprodukten herühren, wurden zu Vergleichszwecken herangezogen. So wurden histopathologische Vergleiche von sechs Charakteristika zwischen den verschiedenen Kategorien aufgezeichnet. Die Intensität dieser Charakteristika wurde gemäß einer willkürlichen Scala (0, 1, 2 usw.) angegeben.

Alle Proben, die weniger als einen Grad der Intensität für irgendein Charakteristikum aufwiesen, wurden für die Berechnung in der Tabelle als 0 chiffriert. Weniger als 1 Grad der Intensität stellten zumeist gewöhnlich ein oder zwei erkennbare Entzündungszellen oder verlagerte Odontoblasten dar. Diese Tabelle soll in ihren wichtigsten Punkten hier wiedergegeben werden.

Umdrehungen/min.	6 000	6 000	20 000	20 000	50 000	150 000	200 000	200 000
Kühlung	Spray	keine	Spray	keine	Wasser	Spray	Spray	Luft
Länge des Experiments (Tage)	71	71	44	44	93	132	89	44
Zahl der Proben	32	27	31	30	75	53	96	22
Durchschnittl. Präparationszeit (sec.)	42,9	46,3	31,5	48,6	33,4	14,0	19,1	22,1
Durchschnittl. zurückbleib. Dentin (mm)	0,84	0,78	0,97	0,94	1,02	0,80	0,97	0,75
Hirzveränderungen 20 Tage und darunter								
Intensität	7	5	0	14	0	0	0	3
Prozent	46,7	50,0	-	82,4	-	-	-	75,0
Durchschnittl. zurückbleib. Dentin (mm)	0,80	0,60	-	0,85	-	-	-	0,40
Veränderungen nicht begrenzt auf die angeschnitt. Dentin- tubuli								
Intensität	0	17	0	19	0	0	0	8
Prozent	-	63,0	-	63,3	-	-	-	36,3
Durchschnittl. zurückbleib. Dentin (mm)	-	0,69	-	0,80	-	-	-	0,52
Irreguläres Sekundärdentin (20 Tage und darüber)								
Intensität	7	16	6	9	10	9	21	11
Prozent	41,2	84,2	40,0	53,0	19,2	17	28,0	61,0
Durchschnittl. zurückbleib. Dentin (mm)	0,72	0,74	1,01	0,71	0,91	0,59	0,91	0,81
Zellverschiebung								
Intensität	16	14	18	24	8	8	17	7

Prozent	50,0	51,9	58,1	80,0	10,7	15,0	17,7	31,8
Durchschnittl. zurückbleib. Dentin (mm)	0,78	0,72	0,81	0,94	0,93	0,66	0,64	0,52
Durchschnittl. Intensität für alle Proben	0,88	0,89	1,03	1,90	0,17	0,27	0,27	0,50
Zellexsudate Intensität	22	18	24	28	27	12	28	9
Prozent	68,8	66,7	77,4	93,3	36,0	22,6	29,1	41,0
Durchschnittl. zurückbleib. Dentin (mm)	0,76	0,74	0,50	0,90	1,04	0,64	0,88	0,58
Durchschnittl. Intensität von oberflächlichen Exsudaten für alle Proben	1,00	0,82	1,23	1,73	0,19	0,25	0,29	0,64
Durchschnittl. Intensität von tiefen Exsudaten für alle Proben	0,84	0,82	1,13	1,50	0,37	0,35	0,32	0,50
Verzögerte Heilung und Abszeßbildung								
Intensität	5 (1 A)	4 (1 A)	3	8 (3 A)	0	2	2	2 (1 A)
Prozent	15,6	14,8	9,7	26,6	-	3,8	2,1	9,1
Durchschnittl. zurückbleib. Dentin (mm)	0,65	0,60	0,70	0,61	-	0,23	0,51	0,41
Bohrgeräte (umgekehrt) konisch	Nr. 37 Diamant- stein	Nr. 37 Diamant- stein	Nr. 37 Diamant- stein	Nr. 37 Diamant- stein	Nr. 36 Diamant- stein	Nr. 35 Wolfram- carbide- bohrer	Nr. 35 Wolfram- carbide- bohrer	Nr. 35 Wolfram- carbide- bohrer
	Ø 1,5	Ø 1,5	Ø 1,5	Ø 1,5	Ø 1,3	Ø 0,9	Ø 0,9	Ø 0,9

Tabelle 2 Reaktionen der menschlichen Pulpa auf acht verschiedene Bohrtechniken nach Stanley und Swerdlow (Erklärung siehe Text)

Außer diesen in der Tabelle angeführten Versuchen wurden noch 54 Versuchszähne in weniger als einer Stunde extrahiert. Es fand sich vor allem eine Auflösung der Odontoblastenschicht mit oberflächlicher Verschiebung der Odontoblasten in das Praedentin oder wenig darüber hinaus, dazu geringe pathologische Veränderungen anderer Art. Diese Charakteristika waren öfters vorhanden und waren auffallender in den Kategorien, in welchen keine Kühlung oder ein Luftstrom benutzt wurden.

Nur eine Probe von der 6 000 U/min. Nr. 37 Diamantstein - keine Kühlung - Kategorie hatte eine Verletzung, die sich über die angeschnittenen Dentinkanälchen erstreckte, mit den Anzeichen einer möglichen Hitzeschädigung. Entzündungszellen wurden in keiner einzigen Probe gefunden, ohne Rücksicht auf die Dicke des zurückbleibenden Dentins. In der High-Speed-Kategorie zeigten einige Proben, bei denen so wenig wie 0,1 mm Dentin oder nur das Praedentin zurückblieb, am Kavitätenboden keine pathologischen Veränderungen. Hitzeschädigungen zeigten Proben in 4 Kategorien, nämlich in der 6 000 U/min. mit und ohne Kühlung-Gruppe, in der 20 000 U/min. ohne Kühlung - Gruppe und in der 200 000 U/min. mit Luftstrom - Gruppe. Weiter fanden sich in drei Kategorien Veränderungen, die nicht auf die angeschnittenen Dentinkanälchen beschränkt waren; In der 6 000 U/min. ohne Kühlung, in der 20 000 U/min. ohne Kühlung, in der 200 000 U/min. Luftstrom - Gruppe. Diese Verletzungen bestanden aus Verbrennungsmerkmalen und irregulärer Dentinbildung. Irreguläres Dentin fand sich in Proben aller Kategorien. Wieder zeigten die Proben, bei welchen eine unzureichende oder keine Kühlung benutzt wurde, das größte Vorkommen dieses Merkmales.

Die 20 000 U/min. Nr. 37 Diamantstein-Spray-Kategorie, ebenso jene mit dem größten durchschnittlich zurückbleibenden Dentin (1,01 mm) wiesen gegenüber den High-Speed-Kategorien mit gleichmäßiger Kühlung wesentlich stärkere Sekundärdentinbildung auf. Die stärkste Bildung von irregulärem Dentin fand sich in den Proben bei 200 000 U/min., wenn statt Spray Luft zur Kühlung benutzt wurde.

Zellverschiebungen waren in den 3 höheren Touren-Kategorien mit gleichmäßiger Kühlung, verglichen mit den niederen Tourenkategorien, ohne Rücksicht auf die Kühlung, nur in sehr niedriger Prozentzahl vorhanden. Die Prozentzahl des Auftretens von Zellverschiebungen vermehrte sich merkbar, wenn Luftkühlung an Stelle des Wassersprays bei 200 000 U/min. gesetzt wurde.

Nahezu parallel mit dem Auftreten von Zellverschiebungen fanden sich auch Zell-exsudate. Die größten Prozentzahlen fanden sich hier wieder in niedertourigen Kategorien bei 6 000 - 20 000 U/min. ohne Rücksicht auf die benutzte Kühlungsart. Die Proben bei 20 000 U/min. Nr. 37 - Diamantstein - kein Spray - Kategorie hatten die höchste Prozentzahl im Auftreten von Exsudaten, trotz der größten Dicke des durchschnittlich zurückbleibenden Dentins. Die durchschnittliche Intensität der Zellexsudate in den oberflächlichen Geweben für die Gesamtzahl der Proben

war sehr niedrig, besonders bei den höchsttourigen Gruppen mit Spray-Kühlung. Am stärksten fanden sich Zellexsudate bei der 20 000 U/min. - ohne Spray - Kategorie. Mit den tiefen Exsudaten verhielt es sich ähnlich. Das Auftreten von verzögerter Heilung folgte der Tendenz der anderen Merkmale mit dem größten Vorkommen in der 20 000 U/min. Nr. 37 Diamantstein - ohne Kühlung - Kategorie. Zwei Fälle fanden sich sowohl bei 150 000 U/min. als auch bei 200 000 U/min. - Spray - Kategorie; aber diese Proben besaßen eine außergewöhnlich geringe Dicke des zurückbleibenden Dentins.

Abszeßbildungen fanden sich in vier Kategorien, in drei davon wurde eine unzulängliche Kühlung benutzt, während in einem Fall die Kühlung für ausreichend gehalten wurde, nämlich bei:

- 6 000 U/min. - Spray
- 6 000 U/min. - kein Spray
- 20 000 U/min. - kein Spray
- 200 000 U/min. - Luftkühlung

Abszeßbildungen fanden sich nur in jenen Kategorien, wo Hitzeschädigungen gefunden wurden. Abszeßbildungen konnten früher als 6 Tage beobachtet werden, waren oft sehr ausgeprägt, zeigten aber in keiner Weise ein rapides Absterben der Pulpa an. Wegen der ziemlich schweren Entzündungsantworten, die in den Proben mit 6 000 und 20 000 U/min. Nr. 37 Diamantstein - Kategorie hervorgerufen wurden, ebenso bei Anwendung einer Kühlung, erhob sich die Frage, ob das verletzte Agens eher der Diamantstein Nr. 37 ist als die angewandte Tourenzahl. 53 Zähne wurden daher mit einem Nr. 35 Carbid-Bohrer, mit und ohne Spray, bei 6 000 und 20 000 U/min. präpariert. Obwohl die Zahl der Proben zu gering und ungleichmäßig verteilt war, um irgendeinen herausgearbeiteten Vergleich zu erlauben, wurden doch sichere, einleuchtende Tatsachen festgestellt. Die 6 000 als auch die 20 000 U/min. Nr. 35 Wolfram-Carbidbohrer-Spray-Gruppe zeigten Ähnlichkeit im Auftreten und in der Intensität von Zellexsudaten und Odontoblasten-Verschiebung mit der Nr. 37-Diamantstein-Spray-Gruppe. Ein ganz besonderes Ergebnis war jedoch die Ähnlichkeit der Proben bei 6 000 und 20 000 U/min. - Nr. 35-Carbidbohrer-keine Kühlung - Kategorie mit den Proben in der Nr. 37-Diamantstein-Spray-Kategorie. Keine Brandverletzungen, keine ausgedehnten Verletzungen oder Abszesse wurden gefunden, ob eine Kühlung benützt wurde oder nicht.

Ergebnis:

Die drei Techniken mit höchsten Touren und ausreichender Kühlung können als biologisch sicher betrachtet werden. Die Tourenzahlen von 6 000 und 20 000 werden zwar bei Verwendung von Bohrern als Schneidinstrumente biologisch annehmbarer gemacht, aber sicherlich nicht gleich mit den höheren Touren. Die Kombination High-Speed kontrollierte Temperatur und leichter Druck führt zu minimalen

pathologischen Pulpenveränderungen.

Das Endergebnis von Swerdlow und Stanley stimmt also mit dem Ergebnis der von mir durchgeführten Auswertung über die verschiedenen Drehzahlbereiche und ihre Auswirkung auf die Pulpa in dem für meine Arbeit wichtigsten Punkt, nämlich in der Auswirkung der Luftturbine auf die Pulpa, überein. Aus beiden Arbeiten geht hervor, daß höchste Drehzahlen, wie sie auch durch die Luftturbine erzeugt werden, sich biologisch günstiger auf die Pulpa auswirken, als kleinere Drehzahlbereiche, wobei aber von mir die Einschränkung gemacht wird, daß dies nicht in Pulpennahe zutrifft. Auch die im nächsten Kapitel aufgeführten eigenen Untersuchungen unterstreichen dieses Ergebnis. Im letzteren Fall halte ich Drehzahlbereiche von 5 000 - 20 000 U/min. unter Verwendung von Wolfram-Carbidbohrern, Spray und leichtem Druck für günstiger. Keine Übereinstimmung dagegen ist über höchste Tourenzahlen, die durch maschinengetriebene Instrumente erzeugt werden, zu erzielen, da nach meiner Auswertung die Pulpenreaktionen hier größer sind als bei Drehzahlbereichen zwischen 5 000 - 20 000 U/min. und ebenfalls größer als auf Airotor-Behandlung.

IV. EIGENE UNTERSUCHUNGEN

Es soll im folgenden ebenfalls die Auswirkung der Luftturbine auf die Pulpa unter normalen Bedingungen untersucht werden.

Klinische Methode: Von Patienten im Alter zwischen 10 - 25 Jahren wurden acht kariesfreie permanente Zähne, die aus kieferorthopädischen Gründen extrahiert werden mußten, zur Untersuchung herangezogen. An sechs Zähnen wurden mit dem KaVo-Borden-Airotor unter Verwendung bestmöglicher Spraykühlung Bohrlöcher mit verschiedenem Abstand (0,1 - 1,4 mm) Kavitätenboden-Pulpa geschaffen. Dies erfolgte entweder von occlusal oder palatinal her bei leicht tupfender Arbeitsweise, teils mit oder ohne Injektion. Dazu wurde ein FG-Rosenbohrer Nr. 2 (1,1 mm Ø) bei 250 000 - 300 000 U/min. verwandt. Die Bohrzeit betrug durchschnittlich 10 Sekunden, vier der Zähne wurden 5 - 10 Minuten nach der Airotorbehandlung extrahiert, bei einem lag eine Beobachtungszeit von 6, bei dem anderen eine von 38 Tagen vor. In den beiden letzten Fällen wurden die Kavitäten mit Guttapercha verschlossen.

Ein kontralateraler Zahn + 5 wurde zur Kontrolle benützt, während ein weiterer mit der normalen Emda-Bohrmaschine unter Verwendung eines Stahlrosenbohrers Nr. 3 bei 5 000 - 6 000 U/min. ohne Kühlung von occlusal her angebohrt wurde. Dieser letzte Versuch wurde aus Gründen der besseren Einordnung bereits im letzten Kapitel angeführt.

Histologische Methode:

Die Zähne kamen zur Fixierung sofort nach der Extraktion für 8 - 10 Tage in 10 % Formalinlösung. Die Entkalkung erfolgte in 5 % Salpetersäure, je nach Größe der Zähne 3 - 4 Wochen lang, hierauf 1 Tag in Natriumsulfat. Anschließend wurden die Zähne 24 Stunden gewässert, danach in der aufsteigenden Alkoholreihe entwässert. Die entkalkten dehydrierten Zähne wurden nun in 2 %, 4 %, 8 % Zelloidin für ungefähr je 4 Wochen eingebettet, in Würfelform ausgeschnitten und in 70 % Alkohol gehärtet. Mit dem Schlittmikrotom wurden Schnitte von durchschnittlich 20 μ Stärke hergestellt. Diese Schnitte wurden mit Hämatoxylin-Eosin gefärbt und getrocknet. Die mikroskopische Untersuchung erfolgte mit einem Lichtmikroskop. Der Abstand der Pulpa - Kavitätenboden wurde mit dem Mikrometerokular bestimmt.

Fall 1) Patient G. H. 12 Jahre alt.

Versuchszahn 2 + von palatinal unter Injektion Xylestesin-N) angebohrt.
Abstand Kavitätenboden - Pulpa 0,5 mm.
Extraktion nach 10 Minuten.

Histologischer Befund:

Direkt unter der Kavität haben sich die Odontoblasten blasenförmig vom Dentin abgehoben, nach beiden Seiten daran anschließend weisen sie eine deutliche Vakuolenbildung auf. Da es sich um einen jugendlichen Zahn handelt, finden sich sonst in der Pulpa im Bereich der Odontoblasten keine Veränderungen. In der Pulpa selbst sind keine pathologischen Veränderungen zu beobachten.

Fall 2) Patient W. A. 10 Jahre alt.

Versuchszahn: 5 + von occlusal im Bereich der Fissur unter Injektion (Xyl. -N) angebohrt.
Abstand Kavitätenboden-Pulpa 0,5 mm.
Extraktion nach 10 Minuten.

Histologischer Befund:

Während in der übrigen Pulpa die Odontoblasten durch eine deutliche Praedentinschicht von eigentlich verkaltem Dentin getrennt sind, fällt auf, daß in dem dem incisalen Teil der Kavität entsprechenden Pulpenteil die Odontoblastenkerne in das Praedentin und vereinzelt auch in die Dentinkanälchen vorgedrungen sind. Die Pulpa selbst weist insgesamt verbreitete Gefäße auf. Auch die Kapillaren in den Randbezirken sind deutlich zu erkennen. Dies dürfte jedoch nicht mit der Präparation, sondern mit dem Entwicklungsstadium des Zahnes zusammenhängen.

Der kontralaterale Vergleichszahn + 5 weist eine normale Pulpa mit relativ weitem foramen apicale auf. In beiden Fällen ist das Wurzelwachstum noch nicht ganz abgeschlossen.

Fall 3) Patient H.B. 12 Jahre alt

Versuchszahn; 4 + von occlusal im Bereich der Fissur unter Injektion (Xyl. -N) angebohrt.

Abstand Kavitätenboden-Pulpa 1, 4 mm

Extraktion nach 2 Minuten.

Histologischer Befund;

In der Pulpa wie auch im Bereich der Odontoblasten zeigen sich keinerlei pathologische Veränderungen.

Fall 4) Patient U.L. 24 Jahre alt

Versuchszahn; - 8 von occlusal im Bereich der Fissuren ohne Injektion angebohrt.

Die Kavität wurde mit Guttapercha verschlossen.

Abstand Kavitätenboden - Pulpa 1, 5 mm

Extraktion nach 6 Tagen.

Histologischer Befund;

Die Pulpa zeigt in allen Teilen regressive Veränderungen, die Odontoblasten sind vakuolig degeneriert. Am Boden der Pulpenkavums ist die Pulpa großmaschig, zentral im Zahnmark kleinmaschig netzförmig atrophiert. In der ganzen Pulpa findet sich Stauungshyperämie.

Fall 5) Patient A.M. 25 Jahre alt

Versuchszahn; - 8 von occlusal im Bereich der Fissuren ohne Injektion angebohrt.

Die Kavität wurde mit Guttapercha verschlossen.

Abstand Kavitätenboden - Pulpa 1, 0 mm

Extraktion nach 38 Tagen.

Histologischer Befund;

Es fällt auf, daß die Dentinkanälchen nahe der Kavität durch ihre intensive Blaufärbung stellenweise deutlicher hervortreten als im übrigen Dentin. Auch die Seitenkanälchen sind zu erkennen. Im Bereich der Pulpa hat sich gegenüber dem geschaffenen Defekt eine dünne Schicht Sekundärdentin abgelagert, während die Pulpenhörner kein irreguläres Dentin aufweisen. An einer Stelle zeigt sich ein deutlicher Blutungsherd, im Bereich der Odontoblasten und des darunterliegenden Pulpengewebes. In dem einen Pulpenhorn finden sich: Stark erweiterte Gefäße, geringe diffuse Rundzelleninfiltration, sowie homogene Anfärbung der Randzone der Pulpa mit Eosin. Die Gefäße lassen Randstellung von Leukocyten und Lymphocyten deutlich erkennen. Die Odontoblasten stellen im Bereich des Sekundärdentins nur eine dünne einreihige Zellschicht dar.

Fall 6) Patient R. B. 10 Jahre alt.

Versuchszahn: 2 + von palatinal unter Injektion angebohrt.

Abstand Kavitätenboden - Pulpa 0,1 mm

Extraktion nach 5 Minuten.

Histologischer Befund:

Gegenüber dem Kavitätenboden haben sich die Odontoblasten in Form einer großen Blase vom Dentin abgehoben. Im gesamten Pulpenhorn finden sich Blutungsherde sowie verstreut Rundzellen im Gewebe. Wurzelwärts schließt eine Zone an, die durch seröse Entzündung gekennzeichnet ist. Die übrige Pulpa zeigt keine pathologischen Veränderungen. Es handelt sich hier um einen Zahn mit noch nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum.

Ergebnis:

Folgende histologischen Veränderungen konnten an den untersuchten Pulpen auf Airotorbehandlung festgestellt werden:

- | | |
|--|-------------|
| 1.) Vakuoläre Degeneration der Odontoblasten | in 2 Fällen |
| 2.) Odontoblastenkern-Aspiration | in 1 Fall |
| 3.) Diffuse Rundzelleninfiltrate | in 2 Fällen |
| 4.) Erweiterte Gefäße im Pulpengewebe | in 2 Fällen |
| 5.) Hohlraumbildungen zwischen Praedentin und
Odontoblastenschicht | in 2 Fällen |
| 6.) Blutungsherde | in 2 Fällen |
| 7.) Degenerative Veränderungen im Pulpengewebe | in 1 Fall |
| 8.) Stauungshyperämie | in 1 Fall |
| 9.) Randstellung von Leukocyten und Lymphocyten in
den Gefäßen | |
| 10.) Intensivere Blaufärbung der Dentinkanälchen und
homogene Anfärbung der Randzone der Pulpa mit
Eosin | |
| 11.) Als typische Spätfolgen bei dem Präparat mit 38 Tagen
Beobachtungszeit: | |
| a) Reduzierung der Odontoblasten auf eine einzige Zellschicht | |
| b) Senkündentinitisbildung (calciotraumatic response) | |

Die hier in eigenen Versuchen ermittelten Ergebnisse stimmen hinsichtlich ihrer Qualität genau mit denen von anderen Autoren gefundenen überein. Eine genaue Prozentzahl der einzelnen Veränderungen anzugeben, ist wegen des geringen Untersuchungsmaterials nicht möglich; außerdem könnte man die Fälle 4 und 5 zu einer exakten Ermittlung dieser Art nicht mit den übrigen Präparaten vergleichen,

da sie eine wesentlich längere Beobachtungszeit aufweisen. Wenn man den Fall 4 vollkommen ausschließt - da nach meiner Ansicht diese dort aufgefundenen Veränderungen schon vorher vorhanden waren, mit dem Bohrprozeß also nichts zu tun haben - so kommt man bei dieser Versuchsdurchführung unter normalen praxisnahen Bedingungen mit bestmöglicher Spraykühlung zu einer Schädigungsquote von 80 %. Dieses prozentuale Ergebnis unter normalen Bedingungen ermittelt, würde ebenfalls mit der von mir aus den Untersuchungsergebnissen anderer Autoren errechneten Schädigungsquote von 70 - 80 % unter optimalen Bedingungen ungefähr übereinstimmen. Es sei hier darauf hingewiesen, daß zu den "optimalen Bedingungen" auch eine genügende Dicke zurückbleibenden Dentins zwischen Kavitätenboden und Pulpa zu zählen ist, denn dieser Faktor ist meiner Ansicht nach für die Frage Schädigung der Pulpa oder nicht, Grad der Schädigung usw. als der bedeutendste bei dem ganzen Turbinenproblem einzuschätzen.

Nach Auswertung meiner eigenen Versuchsergebnisse scheint mir ebenfalls die Anwendung der Luftturbine, auch in biologisch-histologischer Hinsicht, gerechtfertigt zu sein, vorausgesetzt, daß unter optimalen Bedingungen gearbeitet wird, wobei eine Dentinschicht von mindestens 1 - 1,5 mm zwischen Kavitätenboden und Pulpa zurückbleiben muß. Veränderungen an der Pulpa dürften dann kaum mehr zu erwarten sein. Etwa doch auftretende Schäden werden sich nur auf die Odontoblastenschicht erstrecken und dürften durch die Reparationskraft der Pulpa in einigen Wochen beseitigt sein.

Bei einem so minimalen Abstand Kavitätenboden-Pulpa wie z.B. 0,5 mm jedoch kann histologisch das günstige Temperaturverhalten des Airotors, wie im ersten Hauptteil festgestellt wird, nicht mehr ganz bestätigt werden. Die bei diesem Abstand vorgefundenen Veränderungen erstreckten sich zwar nur auf die Odontoblastenschicht, waren hier jedoch teilweise sehr ausgeprägt (Hohlraumbildung, vakuolige Degeneration, Kernaspiration). Hinzu kommt noch, daß bei dieser kurzen Beobachtungszeit (10 Minuten) eine volle Auswirkung der Schädigung nicht zu erwarten ist. Im pulpenahen Dentin ist also der Airtor nicht mehr indiziert.

Um obengenannte Behauptungen hinsichtlich Qualität und Schädigungsquote der aufgetretenen Veränderungen zu untermauern und auch der besseren Übersicht halber sollen die eigenen Untersuchungsergebnisse in einer Tabelle zusammengefaßt werden, wobei Fall 4) aus obengenannten Gründen nicht berücksichtigt werden soll:

Tabelle 3 - Ergebnisse der eigenen Versuche

Nummer der Untersuchungs-fälle	Abstand Kavitäten-boden-Pulpa	Extraktions-zeit nach	Aufgetretene Veränderungen in der Odontoblastenschicht	Aufgetretene Veränderungen im Pulpengewebe selbst	Aufgetretene Veränderungen im Prædentin und Dentin
Fall 1) 2 + Patient 12 Jahre alt	0,5 mm	10 Min.	blasenförmige Abhebung der Odontoblasten vom Dentin unterhalb der Kavität seitlich derselben weisen sie Vakuolenbildung auf	---	---
Fall 2) 5 + Patient 10 Jahre alt	0,5 mm	10 Min.	Odontoblastenkernaspiration ins Prædentin und Dentin unterhalb der Kavität	---	---
Fall 3) 4 + Patient 12 Jahre alt	1,4 mm	5 Min.	---	---	---
Fall 5) - 8 Patient 25 Jahre alt	1,0 mm	38 Tage	Blutungsherd im Bereich der Odontoblasten unter der Kavität. Odontoblasten stellen im Bereich des Sekundär-dentins nur eine dünne einreihige Zellschicht dar.	Blutungsherd im unter der Kavität gelegenen Pulpen-gewebe. In einem Pulpen-horn stark erweiterte Gefäße. Geringe diffuse Rundzelleninfiltration im gesamten Gewebe. Homogene Anfärbung der Randzone der Pulpa mit Eosin	Gegenüber dem geschaffenen Defekt Bildung einer dünnen Schicht von Sekundär-dentin. Dentinkanalchen nahe der Kavität treten durch intensivere Blaufärbung deutlich hervor.
Fall 6) 2 + Patient 10 Jahre alt	0,1 mm	5 Min.	Odontoblasten haben sich gegenüber der Kavität in Form einer großen Blase vom Dentin abgehoben.	Blutungsherde im Pulpen-horn sowie verstreut Rundzellen im Gewebe, nach wurzelwärts findet sich eine seröse Entzündung.	

Auswertung der Tabelle:

Da 4 von den 5 hier angeführten Versuchszähnen Veränderungen aufweisen, liegt die Schädigungsquote bei 80 %. Rein qualitativ konnten dieselben Veränderungen festgestellt werden, wie sie auch bei Untersuchungen anderer Autoren gefunden wurden. Deutlich ist auch aus dieser Tabelle zu ersehen, daß mit Verringerung des Abstandes Kavitätenboden-Pulpa der Schweregrad der Schädigungen zunimmt.

V. DISKUSSION DER PHYSIKALISCHEN UND HISTOLOGISCHEN ERGEBNISSE

1. Diskussion der physikalischen Ergebnisse

Wie die Beurteilung der Luftturbine in bezug auf die schmerz erzeugenden physikalischen Größen Druck, Vibration, Temperatur, Traumabildung, Kühlung und Ultraschallwirkung ergaben, schneidet die Luftturbine hier fast überall sehr günstig ab. Was den Druck betrifft, so ist es rein theoretisch gesehen auf Grund der hohen Umdrehungszahl und der daraus resultierenden Schnittgeschwindigkeit ($V = U/\text{min.} \times 2 \pi r \times \frac{1}{60}$) gar nicht notwendig, eine große Vorschubkraft beim Bohrprozeß aufzuwenden, da hier selbst eine stumpfe Boherschneide es gar nicht schwer hat, wenn sie mit dieser hohen kinetischen Energie auf die Zahnhartsubstanz auftrifft, ein Stück derselben daraus abzuspalten.

Abgesehen davon wäre es ja auch rein praktisch gesehen gar nicht möglich, da ja die Antriebskraft dieser Geräte, der Luftstrom, nur einen Auflagedruck bis 40 gr gestattet. Der Auflagedruck spielt also beim Airtorverfahren als mechanischer Reizfaktor und damit als Schädigungsursache der Pulpa fast überhaupt keine Rolle.

In Hinsicht auf die Vibration muß gesagt werden, daß das Vibrationsempfinden einerseits von der Intensitätsschwelle (gegeben durch diejenige Schwingungsamplitude des Zahnes, bei der ein Vibrieren gerade spürbar wird), andererseits vom Schwingungsweg abhängig ist. Letzterer kann nun durch steigende Frequenzen und exakte Lagerung der Instrumente verringert werden. Bei der Luftturbine ist es nun gelungen, den Schwingungsweg eben durch die hohe Frequenz und den fast vollkommen zentrischen Lauf der Instrumente so zu verkleinern, daß er weit unterhalb der Intensitätsschwelle liegt und daher keinerlei Vibration mehr empfunden wird. Auch hier wiederum schneidet dieses Gerät so günstig ab wie kaum ein zweites.

Das Temperaturproblem und die Kühlung dagegen sind in gewisser Hinsicht noch als Sorgenkind zu betrachten, wenn es sich auch nicht ganz so schlimm verhält wie vielfach von manchen Autoren dargelegt wird. Zweifellos ist aber die Temperaturentwicklung derjenige physikalische Reizfaktor, der für die histologischen

Pulpenveränderungen hauptsächlich verantwortlich gemacht werden muß. Besonders nämlich, wenn Fehler in der richtigen Auswahl und Anwendungsweise der für die Wärmeentwicklung verantwortlichen physikalischen Faktoren gemacht werden und außerdem im pulpennahen Dentin gearbeitet wird, können sehr schnell Temperaturen entstehen, die in der Pulpa die kritische Temperatur von 40 °C übersteigen. Ist dies der Fall, so liegen die am Pulpdach entstehenden Temperaturen fast immer unterhalb der kritischen Werte und die Anwendung der Luftturbine erweist sich also auch in dieser Hinsicht gerechtfertigt. Diese Ausführungen gelten natürlich nur bei einwandfrei funktionierender Kühlung.

Diese stellt dagegen wirklich noch ein echtes Sorgenkind dar, da die am Zahn auftreffenden Spraytemperaturen sich immer weit unter der physiologischen Temperatur von 36 °C und sehr oft sogar unter dem von Hensel und Mann¹ für den Kälteschmerz ermittelten Schwellenwert von 26,4 °C befinden. Heftige Schmerzreaktionen besonders beim ersten Ansetzen des Bohrers sind natürlich die Folge. Als Abhilfe, bis von der Industrie in dieser Hinsicht verbesserte Geräte geliefert werden, wäre einstweilen die Einschleichmethode und ein Aufmerksammachen des Patienten auf den zu erwartenden Schmerz zu empfehlen. Das Gerät ist also in dieser Hinsicht noch verbesserungsbedürftig.

In bezug auf die mechanische Traumabildung durch den Bohrprozeß dagegen wirkt sich die Anwendung der Luftturbine wiederum äußerst vorteilhaft aus. Wenn auch die Traumabildung zusammen mit der Temperaturentwicklung zweifellos die beiden sich für die Pulpa am schädlichsten auswirkenden mechanischen Reizfaktoren beim Bohrprozeß überhaupt darstellen, so erfolgt doch hier eine Traumatisierung auf eleganteste Art und Weise, wenn ich so sagen darf. Im Gegensatz zu niedertourigen Präparationen, wo vor allem die Odontoblastenfortsätze gequetscht, zerfasert und aus den Dentinkanälen herausgezogen werden, wird hier nicht nur die Zahnhartsubstanz, sondern auch das Weichgewebe in winzigen Quanten schonendst abgetragen, so daß eine glatte Präparationsfläche entsteht. Nach Adolph scheint hier eine Verletzungsart vorzuliegen, die mit dem chirurgisch-scharfen Schneiden verwandt ist. Da nun bei einer glatten Schnittwunde weniger Zellen eröffnet werden, in diesem Fall weniger Odontoblastenfortsätze, ist auch eine schmerzärmere Behandlung gewährleistet. Außerdem kommt es noch durch den hauchartig stauenden Druck, der während der Behandlung auf dem Gerät lastet, durch Verdrängung der obersten Dentinschichten zu einem weitgehenden Verschluß der Dentinkanälen, der noch durch Verklebung des feinen Dentinstaubes mit der aus den Tubuli austretenden Flüssigkeit vervollständigt wird. Die Bildung eines physiologischen Wundverbandes ist das Endergebnis. Das Gerät muß also in dieser Hinsicht als äußerst vorteilhaft bezeichnet werden.

Zum Schluß verbleibt noch die Beurteilung der Luftturbine in Hinsicht auf eine evtl. Ultraschallwirkung. Als Beweis hierfür wird die von Bernier² entdeckte "rebound

response" angeführt, die allerdings nur von Mühlemann ³⁴ bestätigt werden konnte. Nach meiner Meinung wäre an eine derartige Ultraschallwirkung der Turbine durchaus zu denken, zumal, wenn man sich die Auswirkungen des Schalles in lebendem Gewebe, wie Erwärmung desselben, mechanische Zerstörung durch Schall und Kavitation und Auslösung chemischer Prozesse, vor Augen hält. Genaue experimentelle Untersuchungen mit zuverlässigen Ergebnissen liegen hierüber jedoch noch nicht vor. Es kann also momentan über den Airtor hinsichtlich dieser eventuell schwerwiegenden nachteiligen Eigenschaft der Ultraschallaussendung noch kein gültiges Urteil gefällt werden.

Insgesamt betrachtet, glaube ich nach obigen Ausführungen sagen zu dürfen, daß die Anwendung der Luftturbine in physikalisch-technischer Hinsicht gesehen, in der zahnärztlichen Praxis durchaus gerechtfertigt ist. Wie sich das Gerät nun in histologisch-biologischer Hinsicht verhält, soll im folgenden Abschnitt dieses Kapitels erörtert werden.

2. Diskussion der histologischen Ergebnisse

Bei all den Reaktionen der Pulpa auf Kavitätenpräparation ist ein entscheidender Faktor noch mit einzukalkulieren, nämlich der Ausgangszustand der Pulpa. Dieser wird an gesunden Zähnen, je nach Konstitution des einzelnen Individuums, verschieden sein, wiederum auch verschieden an den einzelnen Zähnen desselben Individuums. Ist es also schon schwer, an gesunden Zähnen Prognosen über die etwaige Reaktion der Pulpa auf Kavitätenpräparation zu stellen, so wird dies an bereits geschädigten Zähnen (z. B. mit Füllungen versehen, gelockert usw.) zur Unmöglichkeit.

Diese Tatsache ist natürlich auch bei der Auswertung des histologischen Bildes mit zu berücksichtigen, da ja nach Müller ³⁵ eine normale Pulpa auch an gesunden Zähnen eine Seltenheit darstellt. Weiter können Lokalanästhetica, Extraktion der Zähne und die histologische Technik für etwaige Veränderungen in der Pulpa im histologischen Bild verantwortlich gemacht werden. Um als wirklich beweiskräftige Kriterien gelten zu können, müssen vor allem solche Veränderungen in der Pulpa als Folgen der Kavitätenpräparation gewertet werden, die sich unmittelbar unter den angeschnittenen Dentinkanälchen vorfinden. In der Festlegung der Kriterien für Veränderungen, die in der Pulpa auf Kavitätenpräparationen entstehen und als zuverlässig betrachtet werden können, möchte ich mich im wesentlichen Langeland anschließen, doch den Breitenbereich etwas weiter ziehen, da bei den von Langeland ²⁶ durchgeführten Versuchen mit einer Beobachtungszeit von 4 - 20 Minuten unmöglich die volle Auswirkung der Präparation an der Pulpa zu beobachten sein wird.

Im folgenden sollen nun die bei den eigenen Untersuchungen und denselben anderer Autoren gleichwohl gefundenen Pulpenveränderungen diskutiert werden und versucht werden festzustellen, ob sie als Kriterium einer Schädigung auf Kavitätenpräparation zu werten sind oder nicht:

1.) Odontoblastenkernaspiration:

Diese stellt zweifellos eine äußerst empfindliche Reaktion der Pulpa auf verschiedene einwirkende Agentien dar. Bereits 1941 wurde von Orban ¹² dieses Phänomen beschrieben. Er glaubte, daß diese Körperchen durch Zusammenpressen des Zahnes während der Extraktion in die Tubuli gesaugt oder gepumpt werden. Auch eine Schrumpfung der Tomes'schen Fortsätze mit dem Einziehen von Odontoblastenkernen in die Dentinkanälchen wäre nach Orban ¹² möglich. Siegrist ¹² (1944) hält ein Einpressen der Odontoblastenkerne in die Dentinkanälchen für möglich. Kramer und Mc. Lean ¹² (1952) prägen den Begriff der "aspirated odontoblasts". Nach ihnen beruht diese Erscheinung auf dem Auftreten von Monomergasen bei Akrylatfüllungen.

C.H. Fischer ¹² (1953) nimmt an, daß die Zellen in die Kanäle gelangen, wenn die Tomes'schen Fasern durch mechanische, chemische oder thermische Reize geschädigt werden.

Müller und Maeglin ¹² (1953) meinen, daß die Odontoblasten auf chemische Reize aktiv in die Kanälchen wandern.

Kreudenstein ¹² (1956) spricht von einem Schrumpfungszug der durch Monomer geschädigten Tomes'schen Fasern.

Marsland und Shovelton ³⁰ (1957): Die Odontoblasten werden während der Kavitätenpräparation aspiriert, das beruht auf der dabei entstehenden Erwärmung.

Langeland ²⁶ konnte nur feststellen, daß Odontoblastenkerne und Erythrocyten unter folgenden Bedingungen in die Dentinkanälchen eindringen:

- 1.) Als Folge der Extraktion mit einer Zange
- 2.) Bei Fixation unter Hochdruck
- 3.) Bei Fixation in niedriger Temperatur
- 4.) Bei verschiedenen Arten der Kavitätenpräparation

Swerdlow & Stanley ⁴⁷ (1958) schreiben die in den Dentinkanälchen gefundenen Odontoblasten den Druckunterschieden in Pulpa und Dentin bei einer Entzündung derselben zu.

James & Schour ²¹ bestätigten ebenfalls den höheren Druck in der Pulpenkammer unter einer gefüllten Kavität.

Bränström⁶ (1960) beobachtete Odontoblastenkerne im Dentin, nachdem er Kavitäten einem Unterdruck von 2 - 3 mm Hg ausgesetzt hatte. Dabei konnte er auch eine Reduzierung des Odontoblastens beobachten. Beide Veränderungen waren abhängig von der Länge des Experimentes.

Die gleiche Pulpenirritation konnte Bränström⁶ durch Beblasen des freigelegten Dentins mit einem kontinuierlichen Luftstrom erreichen. Zwei Erklärungen hält er für die Wanderung (bis zu 0,15 mm) der Odontoblastenkerne für möglich:

- 1.) Unterschiedlicher Druck an den beiden Enden der Dentinkanälchen
- 2.) Herabsetzung des Siedepunktes des Wassers in den Dentintubuli durch den von außen herangebrachten niedrigen Druck.

Damit unterstreicht auch Bränström die Möglichkeit, daß ein Verdampfen des Wassers aus den oberen Dentinschichten, kombiniert mit kapillaren Kräften, ein Auswandern der Odontoblastenkerne aus der Pulpa bewirken könne.

Adolph¹ berichtet zu demselben Problem:

Bei trockener und erst recht unter Preßluftkühlung durchgeführter Bearbeitung des Dentins muß befürchtet werden, daß der Hauptanteil der eingebüßten Zell- und Interstitialflüssigkeit der Verdunstung zum Opfer fällt. Auch wir nehmen an, daß vor allem der Wasserverlust aus den peripher eröffneten Odontoblastenfortsätzen die eigentliche Ursache der Odontoblastenkern-Wanderung ist. Durch die Verdunstung entstehen von der Dentinoberfläche her in minimalem Umfang Sogkräfte, die in dem Kapillarsystem der Odontoblastenfortsätze einen intrazellulären, zur Dentinoberfläche gerichteten Plasmastrom hervorrufen. Bei entsprechender Geschwindigkeit und Dauer dieser Strömung können die Zellkerne unter Deformierung ihrer sonst kugelähnlichen Gestalt zur Bleistiftform in die Dentinkanälchen ein Stück weit hineingezwängt werden. Eine über die ganze Tomes'sche Faser weitergeleitete mechanische Zugwirkung auf den Odontoblastenzellkörper an der Pulpa-Dentingrenze kommt unseres Erachtens für die Kernverschiebung aus drei Gründen nicht in Betracht:

- a) Die den Zugkräften zum Ansatz gegebenen Angriffsflächen, nämlich die durchschnittlich 1 μ großen Faserdurchmesser, sind, um solche Fernwirkungen entstehen zu lassen, viel zu klein.
- b) Die Odontoblastenfortsätze sind viel zu dünn und zu lang, außerdem verästelt und gewunden.
- c) Die durch Impressionen in der Dentinkanälchenwand elektronenmikroskopisch belegte Wandständigkeit der Odontoblastenfortsätze läßt beim Herauszerren der Fortsätze erhebliche Reibungswiderstände erwarten.

Daß es sich bei diesen Körperchen um Odontoblastenkerne handelt, teilweise auch um Erythrocyten, neutrophile und eosinophile Leukocyten, darüber dürfte kein

Zweifel mehr bestehen. Dies konnte Langeland in seinen Versuchen einwandfrei nachweisen. Der Wirkungsmechanismus dieses Phänomens ist aber noch nicht eindeutig geklärt. Zwei mir wesentlich erscheinende Theorien stehen sich hier gegenüber; in der einen wird angenommen, daß die Körperchen durch erhöhten Druck im Pulpenkavum in die Tubuli gepreßt werden, die andere halt eine Sogwirkung, die durch verschiedenen Druck an den Enden der Dentinkanälchen zustande kommt, für die Ursache. Erhöhter Druck im Pulpenkavum kann z. B. durch Ansetzen der Extraktionszange entstehen, für den Unterdruck an den Kavitätenflächen dagegen dürften Hitze und Lufteinwirkung, wodurch es zur Verdampfung und Austrocknung des Dentinliquors kommt, verantwortlich zu machen sein. Die Sogtheorie wird von den meisten Autoren (Adolph ¹, Hunkirchen ¹⁹, Branstrom ⁹) vertreten und erscheint auch am einleuchtendsten.

Ich persönlich möchte jedoch diese beiden Theorien für richtig halten, da mir das ganze Problem nur als eine Frage der Druckunterschiede erscheint, wobei es gleich ist, ob im Pulpenkavum ein erhöhter Druck vorliegt oder an den Kavitätenflächen ein verminderter Druck. In beiden Fällen wird ein Druckausgleich durch einen Protoplasmastrom zustande kommen, wobei eben der Zellkern minimal mitbewegt wird. Auch der Umstand, daß Erythrocyten in den Tubuli aufgefunden werden, weist nach meiner Ansicht darauf hin, daß diese nur durch Druck aus den Gefäßen ausgepreßt und in die Kanälchen hineingedrückt wurden. Die hier auftretende Sogwirkung wäre in diesem Fall zweifellos zu schwach.

Die Stärke der Odontoblastenkernaspiration stellt nach Langeland den wichtigsten Beweis für den Grad der Schädigung der Pulpa auf Kavitätenpräparation dar.

2.) Reduzierung der Odontoblastenschicht kommt durch das Auswandern der Kerne in die Tubuli zustande. Findet man sie unter den angeschnittenen Dentinkanälchen, so ist diese ebenfalls als ein Kriterium der Schädigung auf Kavitätenpräparation zu werten.

3.) Unterbrechung der pulpo-dentinalen Membran (James ⁵⁶) findet sich fast immer zugleich bei Kernaspiration. Sie dürfte also auf dieselben Ursachen wie diese, nämlich auf Druck-, Hitze- und Lufteinwirkung, zurückzuführen sein. Findet man sie unter der Kavität vor, so ist sie als Kriterium einer Schädigung auf Kavitätenpräparation zu werten.

4.) Vakuolen- und Hohlraumbildung in der Odontoblastenschicht sind vor allem auf Hitzeeinwirkung zurückzuführen. Aber auch andere Agentien wie Metallionen und Säuren können dafür verantwortlich gemacht werden.

Die Odontoblasten stellen hochdifferenzierte Zellen dar und reagieren dementsprechend äußerst empfindlich auf sämtliche Reize. Marsland und Shovelton ³⁰

machen die Wärmeentwicklung für die Schädigung der Pulpa verantwortlich. Sie glauben, daß durch Hitzeeinwirkung die normale Flüssigkeitsmenge um die Odontoblasten gestört wird und daß dies die Ursache für die Blasen- und Vakuolenbildung ist, ähnlich wie beim ersten thermischen Schädigungsgrad der Haut. Es sei auch möglich, daß diese Flüssigkeitsansammlung die Störungen der Praedentinschicht, die bei vielen Zähnen gesehen werden kann, verursacht.

Langeland dagegen konnte dieselben Erscheinungen auch an der überwiegenden Zahl der Pulpen gesunder Zähne feststellen. Die Vakuolenbildung führt er auf die histologische Technik zurück, ob dagegen die Hohlraumbildung in vivo oder post mortem vor sich geht, ist noch nicht erwiesen. Hohlraumbildung kann entstehen durch Schrumpfung infolge der histologischen Technik, durch Zerfall der Grundsubstanz, durch Entzündung.

Diese Veränderungen können also nur in ausgeprägten, klar auf die Kavität beschränkten Fällen als Kriterium einer Schädigung auf Kavitätenpräparation gewertet werden.

5.) Mikrohämorrhagien finden sich vielfach sowohl in der Odontoblastenschicht als auch in der übrigen Pulpa und sind daher nicht unbedingt in Zusammenhang mit der Präparation zu bringen. Hämorrhagien in der Pulpa können schon infolge der Injektionsanästhesie und Extraktion auftreten, sie sind also nicht immer ein Zeichen, daß der Zahn vorher schädlichen Einflüssen ausgesetzt war. Bei Hyperämie können Erythrocyten im Gewebe verstreut erscheinen, aber das bedeutet nicht, daß sie schon in vivo verstreut wurden. Langeland konnte nämlich nachweisen, daß die Erythrocyten sich über das Gewebe verteilen, während sie in Kanadabalsam fließen.

Mikrohämorrhagien sind daher als kein sicheres Anzeichen einer Schädigung auf Kavitätenpräparation zu betrachten.

6.) Verwaschene Strukturen und unscharfe Begrenzung der Odontoblastenschicht kommen durch Zellüberlagerung vor allem mit Infiltrationszellen zustande. Sie sind nur dann als Kriterium eines Präparationsschadens zu werten, wenn sie vor allem im Bereich der unter der Kavität liegenden Odontoblastenschicht gefunden werden.

7.) Kapillarveränderungen in der Odontoblastenschicht kommen durch mehr oder weniger stärkere Füllung der Kapillaren mit Blut zustande, so daß sie dementsprechend stärker oder schwächer erkennbar sind. Wenn ein Zahn irgendwie traumatisiert wird, sind die Kapillaren stärker mit Blut gefüllt. Es handelt sich dabei aber nicht um eine Neubildung oder Überproduktion von Kapillaren, wie einige Autoren es hinstellen. Langeland fand eine solche "Überproduktion" schon

zwei Minuten nach einer experimentellen Kavitätenpräparation. Es kann sich hier also keineswegs um eine Neubildung handeln. Schon die Luxation des Zahnes während der Extraktion kann eine Blutüberfüllung der Kapillaren hervorrufen, ebenso Rupturen derselben. Es kommt daher nicht darauf an, ob die Zähne zur Gewinnung histologischer Präparate in Leitungsanästhesie oder in Narkose extrahiert werden.

Es ist auch kein sicheres Zeichen einer Stasis oder Thrombose, wenn "dicht gepackte Blutzellen" in den Gefäßen gefunden werden. Unmittelbar nach der Extraktion hört das Blut auf zu fließen und die Erythrocyten lagern sich in dieser oder jener Anordnung ab (z.B. Geldrollenform). Diese Veränderungen können daher nur dann als Kriterium für eine Präparationsschädigung verwendet werden, wenn sie sich deutlich ausgeprägt unter der experimentellen Kavität finden.

8.) Hohlraumbildung, retikuläre Atrophie und fettige Degeneration im Pulpengewebe selbst halten Kalnins¹² (1946), Hill¹² (1949), Nyborg¹² (1955), Lefkowitz (1958) für Artefakte und post mortem Reaktionen.

Langeland²⁶ konnte derartige Erscheinungen in 31 von 33 Präparaten gesunder Zähne beobachten.

Diese Veränderungen sind also als Kriterium für eine Präparationsschädigung im allgemeinen auszuschließen. Nur Hohlraumbildungen in der Grundsubstanz können als solche gewertet werden, vorausgesetzt, daß Entzündungszellen oder Ablagerungen in oder neben den Hohlräumen erkennbar sind.

8.) Veränderungen an den Gefäßen sind oft auch an gesunden Zähnen anzutreffen. Das beruht auf der Anwendung von Anästhesie (Björslin²⁶) und der Schädigung bei Extraktionen des Zahnes (Kramer und McLean²⁶). Da man derartige Veränderungen auch bei Dentinfrakturheilung als physiologisch betrachtet, um den Heilungsverlauf zu beschleunigen, können dieselben analog auch in anderen Fällen als physiologisch bezeichnet werden.

Dick gepackte Blutzellen in den Gefäßen sind auch hier nicht als Zeichen einer Stasis oder Thrombose zu werten. Derartige Veränderungen können nur dann als Zeichen einer pathologischen Reaktion gedeutet werden, wenn sie im zentralen Teil der Pulpa unter dem Kavitätenboden gefunden werden.

10.) Eosinophile Zonen in der Pulpa werden von einigen Autoren als pathologische Reaktion derselben gedeutet. Diese Erscheinung kommt wahrscheinlich durch die Diffusion von eosinophilen Protein durch die Kapillarwände in die Grundsubstanz hinein zustande.

Langeland²⁶ fand eine eosinophile Zone in 13 (von 33) Präparaten von völlig gesunden Zähnen, und zwar besonders stark nach Verzögerung der Fixation, unge-

nügender Fixation bei niedriger Temperatur. Wenn eine experimentelle Schädigung der Kapillaren einige Tage vor der Extraktion stattfand, kann das Exsudat sich organisiert haben, dann färbt es sich mit Eosin, es kann aber auch durch Enzyme aufgelöst sein, dann färbt es sich nicht. Eine Diffusion kann auch post mortem stattfinden.

Also kann auch verzögerte oder ungenügende Fixation die gleichen Bilder ergeben, wie eine echte Reaktion.

Die eosinophile Zone ist also kein spezifisches Kriterium für eine pathologische Pulpareaktion. Sie kann nur dann als solche betrachtet werden, wenn sie sich scharf begrenzt in dem Gebiet befindet, in dem eine Reaktion zu erwarten ist (Langeland ²⁶).

11.) Infiltrationszellen entlang der pulpo-dentinalen Membran finden sich immer nach Kernaspiration. Die Kerne in den Tubuli gehen nach relativ kurzer Zeit zu Grunde und ihre Zerfallsprodukte wirken chemotaktisch auf die Leukocyten (Anderson ²⁶ 1953). Diese Reaktion könnte aber auch als Folge auf Mikroorganismen oder auf Diffusion von Toxinen durch die Tubuli zu werten sein, wenn die Kavität offengelassen wurde oder die Füllung defekt war (Langeland ²⁶).

Diese Reaktion ist als ein Kriterium einer Schädigung auf Kavitätenpräparation zu betrachten, wenn die Infiltrationszellen in größerer Menge unterhalb der angeschnittenen Dentinkanälchen liegen.

12.) Die akute Entzündung in der Pulpa auf Kavitätenpräparation ist also hauptsächlich abhängig von den Zerfallsprodukten der Odontoblastenkerne, denn nach dem Verschwinden derselben konnten auch keine neutrophilen Leukocyten in der Odontoblastenschicht mehr gefunden werden. Dies trifft nicht in Fällen mit starker Kernaspiration zu (Langeland ²⁶). In diesen Fällen fanden sich Leukocyten drei Wochen nachdem die Odontoblastenkerne nicht mehr in den Tubuli beobachtet werden konnten. Allgemein wird angenommen, daß sie nur einige Tage, nachdem sie die Gefäße verlassen haben, in den Geweben existieren können. Ihr Auftreten nach dieser Zeit deutet also auf eine kontinuierliche Reizanwesenheit hin, die durch die Zerfallsprodukte der Kerne verursacht wurden. Dies zeigt also, daß die Entzündung andauern und sich in das unter der Kavität liegende Gewebe ausbreiten kann. Die Infiltrationen, die oft mehr zentral im Pulpengewebe beobachtet werden können, würden diese fortdauernde Entartung des Pulpengewebes anzeigen. Die in diesen Infiltraten vorhandenen Entzündungszellen, Lymphocyten, Plasmazellen oder Makrophagen zeigen an, daß die Entzündung in einen chronischen Zustand übergegangen ist.

Thoma ¹² (1950) berichtet dazu:

Die Reaktionen der Pulpa auf Kernaspiration bestehen gewöhnlich in Hyperämie, Ödemen in der Weil'schen Schicht und exsudatgefüllten Vakuolen in der Odontoblastenschicht. Nach der akuten Phase kann sich fibröses Gewebe in der Pulpenperipherie als Heilungsversuch bilden.

In schweren Fällen kann aber eine retikuläre Degeneration der Pulpa der Fall sein (Erikson ¹²).

13.) Histiocytäre Reaktionen konnten meist in späteren Stadien der Entzündung beobachtet werden, um abgestorbene Zellen zu entfernen.

All diese entzündlichen Veränderungen sowohl in der Odontoblastenschicht als auch im Pulpengewebe selbst können als pathologische Veränderungen auf Kavitätenpräparation gewertet werden, wenn sie in dem Gebiet unter der experimentellen Kavität liegen.

14.) Die in manchen Präparaten beobachtete stärkere Anfärbung der oberflächlichen Dentinschicht dürfte durch Depolymerisation der organischen Substanz in den Dentinkanälchen durch Hitzeeinwirkung zu erklären sein. Da nun bei Hamatoxylin-Eosin-Färbung nur das Hämatoxylin diese verstärkte Anfärbung bewirkt und diese Farbstoffe ein gewisses Selektionsvermögen über verschiedene p-H-Bereiche besitzen, dürfte es hier auch zu einer p-H-Verschiebung im Dentin gekommen sein, und zwar nach der sauren Seite hin.

15.) Sekundärdentinbildung mit besonderer Struktur, die als "calciotraumatic response" im Sinne Berniers ³ zu werten ist, wurde ebenfalls beobachtet. Da nun bei der Präparation tausende von Dentinkanälchen eröffnet und dadurch die darin liegenden Protoplasma-Ausläufer der Odontoblasten geschädigt werden, wird auf die Zahnbeinbildner ein Reiz ausgeübt. Die Präparation von Kavitäten mit geringer Tiefe übt gewöhnlich eine milde stimulierende Reaktion auf die Odontoblasten aus, mit Produktion von regulär-reparativem Dentin (Massler ¹² 1958).

Bei tieferen Kavitäten erfolgt eine raschere Sekundärdentinbildung, aber die Struktur wird irregular und die Verkalkung unvollständig (Weider ¹², Schour-Mohammed ¹ 1956). Bei kleineren Kavitäten fängt die Sekundärdentinbildung in der 2. Woche an, bei tieferen Kavitäten später. Hier brauchen die Odontoblasten eine längere Zeit, um sich auszuheilen. Wenn aber im letzteren Fall die Sekundärdentinbildung beginnt, geht sie um so rascher vor sich. Am Ende der 3. Woche findet man größere Mengen Sekundärdentin (Weider ¹² 1956). Wenn man tiefer als bis zur Hälfte des Dentins präpariert, ist deutlich die maximale Grenze der Sekundärdentinstimulierung erreicht. Nun fängt die Sekundärdentinbildung an abzunehmen. Bei Präparaten bis zu 2/3 Tiefe der Dentindicke fangen die Odontoblasten an zu degenerieren.

Eine langsame Schädigung des Dentins, z.B. durch langsam fortschreitende Karies, reizt an zur Sekundärdentinbildung, dagegen hat eine akute, tiefgehende Karies oder ein tiefer operativer Eingriff meist eine Odontoblastendegeneration und damit ein Aufhören der Sekundärdentinbildung zur Folge.

Nach der Auffassung Fish's ¹⁴ (1932) sind die Dentinkanälchen, die von Karies befallen sind, durch Verkalkung vollkommen blockiert und bilden dadurch eine dicke, undurchdringliche Zone, die man Fish's "dead tract" nennt.

Die Sekundärdentinbildung führt er auf den Kontakt des dead tract mit dem lebenden Pulpengewebe zurück. Mit Fish ¹⁴ sind viele Autoren der Meinung, daß die Präparation einer kariösen Kavität mit darunter liegendem "dead tract" eine geringere Pulpenreaktion hervorrufen würde, als wenn man in frisches Dentin präpariert. Doch Berggren und Cederberg ¹² haben 1952 gezeigt, daß dieser dead tract permeabel ist, außerdem öffnet man bei Präparationen die nicht blockierten Dentinkanälchen durch extension for prevention. Dadurch erfolgt also doch eine Pulpenreaktion (Erikson ¹²).

Reize der verschiedensten Art sind es also, die auf die Odontoblasten einwirken und diese zur Bildung von Sekundärdentin veranlassen. Werden aber die Odontoblasten einer großen Anzahl verschiedener Reize ausgesetzt, so antworten sie mit Bildung eines anormalen Types der Dentinegrundsubstanz. Es entsteht also eine "calciotraumatic response" im Sinne Berniers ², also eine Sekundärdentinbildung mit besonderer Struktur. Diese response der Odontoblasten ist charakteristisch und besteht aus einer Zone hyperverkalktem Dentin und dem sog. "calciotraumatic band", welches einen Komplex von hyper- und hypoverkalkten Zonen von Dentin darstellt.

Die Zone von hyperverkalktem Dentin entspricht atypisch gebildetem Dentin als eine direkte Folge der Schädigung. Diese Zone erscheint mit den mit Hämatoxylin-Eosin gefärbten Schnitten dunkel, während sie bei Silberfärbung hell erscheint. Diese Besonderheit weist auf eine Störung in der Grundsubstanzbildung hin, die sich durch weniger Fibrillen und eine größere Menge von Kalksubstanz manifestiert.

Die Sekundärdentinbildung stellt also ein sehr wichtiges Kriterium der Schädigung auf Kavitätenpräparation dar, da man aus ihrem Vorhandensein bzw. Fehlen oder dem Ausmaß und der Art ihrer Bildung gewisse Schlüsse, wie oben erwähnt, auf die Stärke der Schädigung ziehen kann.

16.) Der Vollständigkeit halber soll auch nochmals die "rebound response" erwähnt werden, die bereits im ersten Hauptkapitel im Zusammenhang mit der eventuellen Ultraschallwirkung des Airotors angeführt wurde.

Sie zeigte sich an den Hundezähnen in Form von Auflösung der Odontoblasten, Ödemen, Entzündung und Veränderungen in der Grundsubstanz, und zwar an der der Kavitätenpräparation gegenüberliegenden Seite, an den Menschenzähnen in Form von umschriebenen degenerativen Prozessen in der Pulpenmitte. Die verschiedene Lokalisation führen Bernier und Knapp² sowohl auf die anatomischen Besonderheiten der Hunde- und Menschenpulpenkammern zurück, als auch auf die verschiedene Lage der Kavitätenpräparation. Diese Erscheinung wurde von Bernier und Knapp² zum ersten Mal beschrieben, konnte aber bisher nur von Muhlemann bestätigt werden. Die genaue Ursache ihrer Entstehung ist noch unbekannt.

17.) Nekrosen konnten nur höchst selten beobachtet werden. Nur in einigen Fällen, wo eine ausnehmend starke Traumatisierung vorlag, waren sie anzutreffen.

All diese Veränderungen sind in ihrem Auftreten hinsichtlich Qualität als auch Quantität in erster Linie von dem Abstand Kavitätenboden-Pulpa abhängig. Nach Shroff¹², Swerdlow und Stanley⁴⁹ kann schon 1-10 mm die Pulpenreaktionen in entscheidendem Ausmaß beeinträchtigen. Erst in zweiter Linie durften die mechanischen Reizfaktoren Druck, Vibration, Temperatur, Traumbildung, "zu kalte Kühlmittel" und evtl. Ultraschall für derartige Pulpenreaktionen verantwortlich sein.

Zach und Cohen⁵⁷ registrieren eine fast lineare Korrelation zwischen abgetragener Dentinmenge und Pulpenreaktion. Bernier und Knapp² fanden, daß die Pulpenreaktion von der Kavitärentiefe abhängig ist.

Ich jedoch möchte mich Stanley und Swerdlow⁴⁹ anschließen, die ebenfalls den Abstand Kavitätenboden-Pulpa als das entscheidende Maß ansehen, denn an großen Zähnen können tiefere Kavitäten angelegt werden als an kleineren und trotzdem kann der Abstand Kavitätenboden-Pulpa bei ersteren größer sein als bei letzteren.

Damit wären natürlich auch die Pulpenreaktionen bei tiefen Kavitäten geringer als bei flachen Kavitäten. Daher scheint mir die Relation Kavitärentiefe-Pulpa etwas ungenau. Dieser Abstand Kavitätenboden-Pulpa hat also für die Anzahl, die Art und den Schweregrad der aufgetretenen Veränderungen den größten Einfluß bei dem ganzen Turbinenproblem. Wenn auch die Anzahl der aufgetretenen Veränderungen, wie obige Aufzählung beweist, sehr groß ist und der Schweregrad der Schädigung oft bedeutend ist, weil eben vielfach die Indikation für die Anwendung der Luftturbine nicht beachtet wird und vielfach auch ihre Anwendung unter optimalen Bedingungen geschieht, so weisen doch sämtliche Autoren am Schluß ihrer Ausführungen über die histologischen Untersuchungen nach Turbinenpräparation darauf hin, daß eben eine richtige Indikation und Anwendung vorausgesetzt die Verwendung der Luftturbine in der zahnärztlichen Praxis in histologisch-biologischer Hinsicht vollkommen gerechtfertigt ist. Dieses Ergebnis wird noch unterstrichen durch

die vergleichende Auswertung der auf Turbinenpräparation entstandenen Schädigungen in meiner eigenen Arbeit, mit solchen in hoch- und normaltourigen Drehzahlbereichen. Während hier die Schädigungsquote fast immer 100 % beträgt, liegt sie bei Turbinenanwendung bei ungefähr 70 - 80 %. Außerdem waren die aufgetretenen Pulpenveränderungen bei gleichen Versuchsbedingungen durchwegs geringfügiger als in anderen Drehzahlbereichen außer in Pulpennähe, wo die Anwendung der Turbine nicht mehr indiziert ist und Drehzahlbereiche von 5 000 - 20 000 bei Verwendung von Spray und Wolfram-Carbidbohrern unter leichtem Druck vorzuziehen sind.

Nicht zuletzt weisen auch meine eigenen Versuche darauf hin, daß wiederum richtige Indikation und Anwendung unter optimalen Bedingungen vorausgesetzt, die Luftturbine biologisch-histologisch gesehen, ein einwandfreies fortschrittliches Gerät für den Zahnarzt darstellt.

Zum Schluß dieses Kapitels möchte ich nicht versäumen darauf hinzuweisen daß wir alle, ob Patienten oder Behandler, der Industrie für die Entwicklung dieses Gerätes dankbar sein müssen und ich möchte dem Wunsche Ausdruck geben, es möchten möglichst viele Kollegen dieses wirklich fortschrittliche Gerät in ihrer Praxis anwenden.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit bestand darin, die Auswirkung des Airotors auf Pulpa und Dentin zu überprüfen.

Einleitend wird die Entwicklung der Bohrgeräte des Zahnarztes aufgezeigt und empfohlen, sich nie sofort einem neuen Geräte zuzuwenden vor allem, wenn seine biologische Wirkungsweise noch nicht wissenschaftlich geklärt ist.

Im ersten Hauptkapitel wird die Wirkungsweise der Luftturbine in bezug auf die schmerzzerzeugenden mechanischen Reizfaktoren Druck, Vibration, Temperatur, mechanische Traumabildung, "zu kaltes Kühlmittel", Ultraschallwirkung untersucht. Die "schmerzarme Behandlung" mit diesem Gerät wird auf seine günstigen Eigenschaften hinsichtlich Druck, Vibration, Temperatur und mechanische Traumasetzung zurückgeführt, während das "zu kalte Kühlmittel" als schmerzzerzeugender Faktor nur unter optimalen Bedingungen als ausreichend betrachtet werden kann.

Die Ultraschallwirkung des Airotors ist noch ungeklärt, scheint aber durchaus möglich zu sein.

Als Ergebnis kann herausgestellt werden:

Rein klinisch-technisch gesehen erweist sich die Anwendung der Luftturbine als äußerst vorteilhaft.

Im zweiten Hauptkapitel werden die bisher durchgeführten histologischen Untersuchungen anderer Autoren über höchsttouriges Bohren mit der Luftturbine und über hoch- und normaltourige Drehzahlbereiche angeführt. Weiter wird ein Vergleich zwischen den histologischen Pulpenreaktionen auf Airotor-Behandlung und solchen in anderen Drehzahlbereichen gezogen. Die Reaktion der Pulpa auf Airotor-Behandlung erwies sich als geringer als die auf Präparationen in sämtlichen anderen Drehzahlbereichen, wenn eine genügend starke Dentinschicht (mindestens 1 - 1,5) zwischen Kavitätenboden und Pulpa zurückbleibt. Im pulpennahen Dentin dagegen erweisen sich Drehzahlen bis 20 000 U/min. unter Spray und leichtem Druck, bei Verwendung von Bohrern, am besten Wolfram-Carbidbohrern, am günstigsten.

Im dritten Hauptkapitel werden die eigenen Untersuchungen dargelegt, die die Ergebnisse anderer Autoren hinsichtlich Qualität und Quantität der aufgetretenen Pulpenveränderungen auf Präparationen mit der Luftturbine im wesentlichen bestätigen. Weiter wird nochmals die Bedeutung der Relation Kavitätenboden-Pulpa für die Qualität und Quantität der aufgetretenen Pulpenveränderungen herausgestellt.

Als Ergebnis der Untersuchungen in diesen beiden Kapiteln kann angeführt werden: Die Anwendung der Luftturbine in der zahnärztlichen Praxis erweist sich auch in biologisch-histologischer Hinsicht als gerechtfertigt.

Im letzten Kapitel wurde schließlich eine Erörterung sowohl der physikalischen als auch histologischen Ergebnisse dieser Arbeit durchgeführt.



Abb.1) Trepan und Handbohrer aus: Proskauer und Witt
Bildgeschichte der Zahnheilkunde

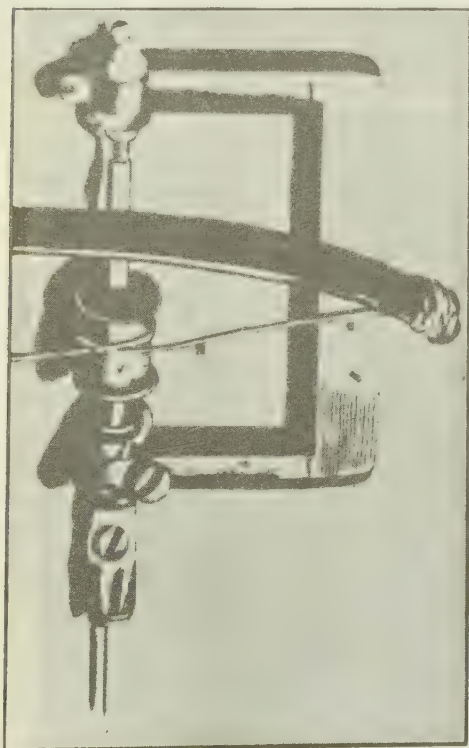


Abb.2) Fiedelbogen
aus: Proskauer und Witt
Bildgeschichte der Zahn-
heilkunde

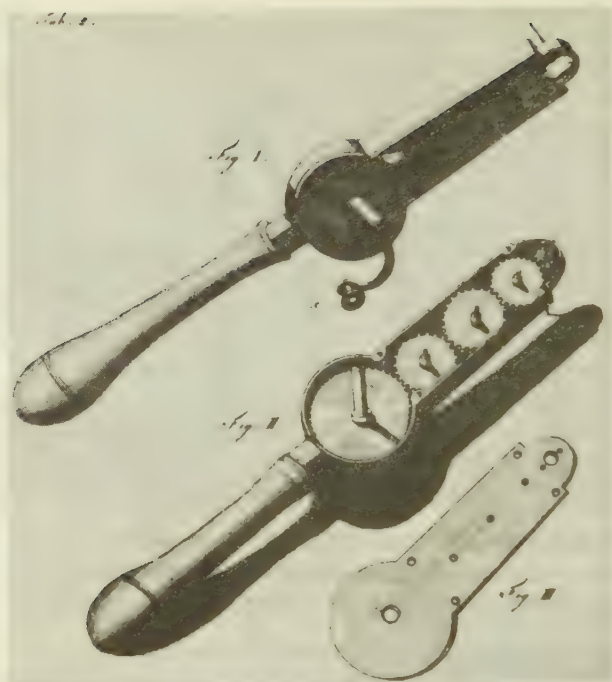


Abb. 3)
Handbohrmaschine nach
Lautenschläger, Berlin,
aus:
Proskauer und Witt
Bildgeschichte der
Zahnheilkunde

Abb. 4)
"Erado"
nach dem Englände.
Harrington aus:
Proskauer und Witt
Bildgeschichte der
Zahnheilkunde



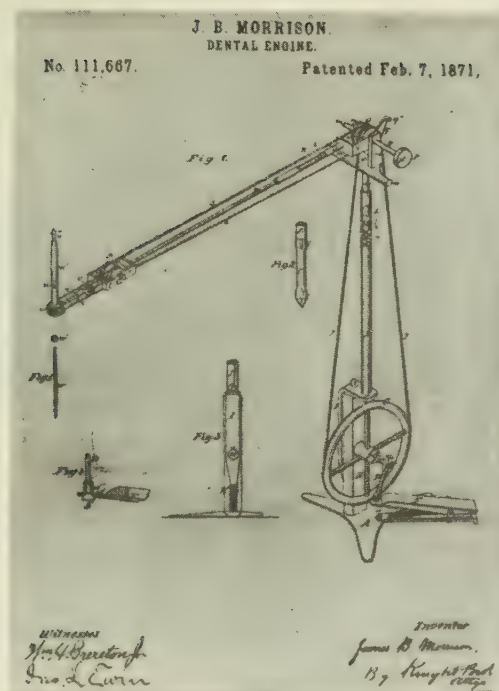
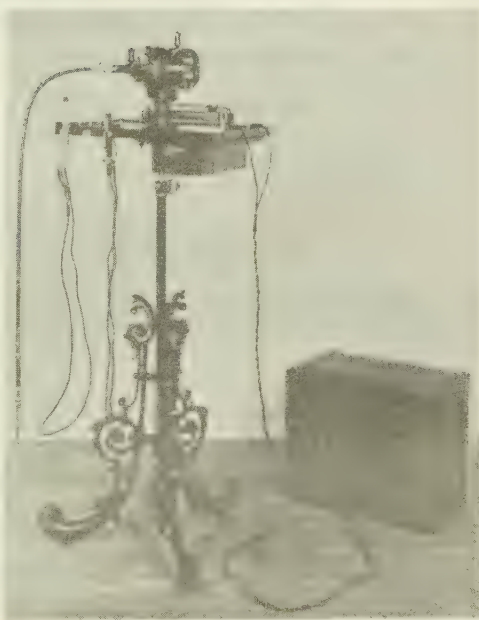


Abb. 5)
Fußtretbohrmaschine
von Morrison 1871 ent-
wickelt, aus;
Proskauer und Witt
Bildgeschichte der
Zahnheilkunde

Abb. 6)
Erste elektrische Bohr-
maschine mit Anschluß
an das Lichtnetz ge-
baut von der Fa. Reiniger
Gebbert & Schall 1891
aus;
Proskauer und Witt
Bildgeschichte der
Zahnheilkunde



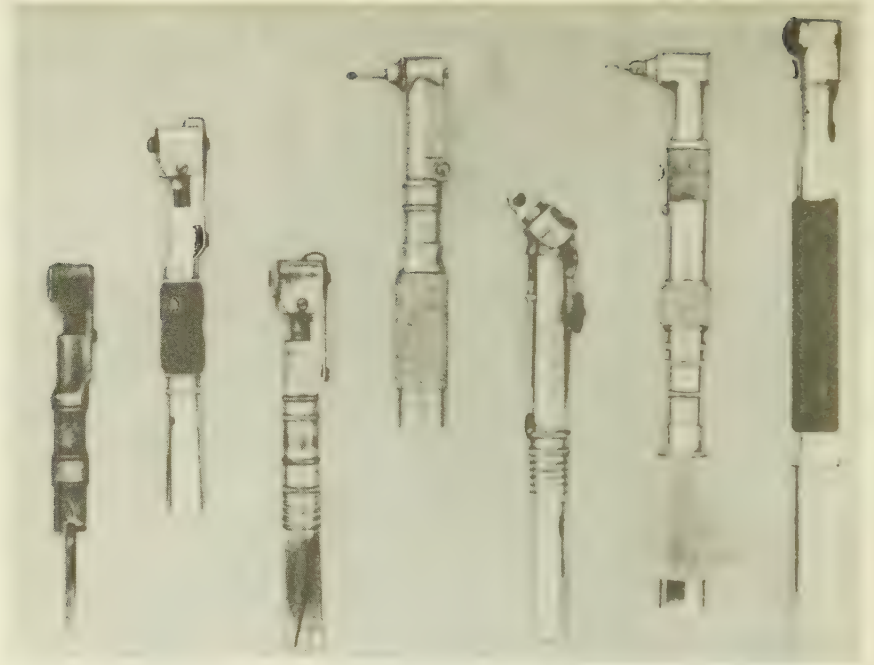


Abb. 7) Erste Winkelstücke
aus: Proskauer und Witt
Bildgeschichte der Zahnheilkunde

LITERATURVERZEICHNIS

- 1.) Adolph W.: Die Struktur der Dentinoberfläche nach deren Bearbeitung mit normal- und höchsttourigen Präparationsinstrumenten
DZZ H.18 1959
- 2.) Bernier J. und Knapp M.: A new pulpal response to high speed instruments
Or. Surg. Or. Med. Or. Path. 11 : 167, 1958
- 3.) Bonsack Ch.: Das Bohren
Deutscher Zahnärztekalendar 1955
- 4.) Boucher Ch. und Matthews L.: Die Anwendung der Luftturbine mit Luftstrom als Kühlmittel
Quintessenz Heft 8 1961
- 5.) Boyd DA und Huysen van: Tooth pulp response to operative procedures
J. Den. Res. 31/459, 1952
- 6.) Bränström M.: Die Antwort von Dentin und Pulpa bei Anwendung eines reduzierten Druckes auf das freigelegte Dentin.
Teil I:
Teil II: Experimentelle Untersuchungen über Reaktion des Dentins und der Pulpa.
Experimente mit verabfolgtem neg. Druck auf entblößtes Dentin.
Acta Odontologica Scandinavica Vol 18 Nu 1, 1960
- 7.) Drum W.: Warmes oder kaltes Kühlwasser beim Airotor
Quintessenz H 9, 1960
- 8.) Eichner K.: Umdrehungsgeschwindigkeit der maschinen- und luftgetriebenen Bohrgeräte
Deutscher Zahnärztekalendar 1959
- 9.) Eichner K.: Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen zum hoch- und höchsttourigen Bohren und Schleifen
DZZ H 3, 1960
- 10.) Eichner K.: Normal-, hoch- und höchsttouriges Bohren und Schleifen
Wissenschaftliche Untersuchungen und klinische Folgerungen II. Teil
DZZ H 3, 1963

- 11.) Engel H.: Befunde an der Pulpa und den Parodontien beschliffener Molaren des Goldhamsters
Med. Diss. Frei Uni Berlin 1953
- 12.) Erikson SE: One tanpulpans reaktion för kavitets preparation,
Svensk tand Tidskrift Vol. 52 Nr. 2, 1959
- 13.) Fechner, U.: Temperaturmessungen an Zahnhartsubstanzen beim normal-, hoch- und höchsttourigen Bohren (Fräsen)
DZZ H 3, 1963
- 14.) Fish E.W.: The pathology of the dentins and the dental pulp
B. Dent. J. 53/351 1932
- 15.) Greuter A.: Einige physikalische Gesichtspunkte zum Präparieren mit hohen Drehzahlen
Schweiz. Monatsschrift für Zhkd. Band 70 Nr. 10 1960
- 16.) Hansen LS. und Nielsen AG.: Comparison of Tissue response to rotary and ultrasonic cutting
J. A. D. A. 52/131, 1956
- 17.) Hensel H. und Mann G.: Temperaturschmerz und Wärmeleitung im menschlichen Zahn
Stoma H 9, S. 76 1956
- 18.) Hofmann M.: Die Temperaturentwicklung im Pulpenkavum und an der Schnittfläche bei der Präparation der Zahnhartsubstanz unter Verwendung der Turbine
DZZ H 8 1961
- 19.) Hunkirchen M.: Ist die Präparation vitaler Zähne ohne ausreichenden Spray bei Anwendung hoher und höchster Umdrehungsgeschwindigkeiten zu verantworten
DZZ H 18 1962
- 20.) Huysen G. und Gurley WB: Histologic changes in teeth of dogs following preparation of cavities of various depth and their exposure to oral fluids
J. A. D. A. 26/87 1939
- 21.) James VE und Schoor J.: Effect of cavity preparation alone on the human dental pulp
J. Dent. Res. 34/758 1955
- 22.) Kennedy J. J., Buckman N. and Proffit WR: Biological response to high speed instruments
J. A. D. A. 58/35 1959

- 23.) Klos H. und Rottke R. : Experimentelle Untersuchungen zum Temperaturproblem beim höchsttourigen Bohren und Schleifen mit Turbinengeräten
DZZ H 4 1960
- 24.) Klos H. und Rottke R. : Ein Diskussionsbeitrag zur Arbeit Drum: Warmes oder kaltes Kühlwasser beim Airtor?
Quintessenz H 12 1960
- 25.) Kluczka J. : Möglichkeiten und Grenzen des Bohrens und Schleifens mit höchsten Drehzahlen
Z P Nr. 3 1960
- 26.) Langeland K. : Tissue changes in the Dental Pulp
Pulp reaction to cavity preparation
Oslo University Press 1957
- 27.) Lefkovitz W., Hamilton B. und Postle H. : Pulp response to Cavity Preparation
J. Prost D. 8/315-24 1958
- 28.) Lisanti VF and Zander H. A. : Thermal injury to normal dog teeth in vivo measurements of pulp temperature increase and their effect on the pulp tissue
J. Dent. Res. 31/548 1952
- 29.) Maeglin B. : Auswirkungen der Kavitätenpräp. mit höchsten Geschwindigkeiten in histologischen Untersuchungen
Schweiz. Monatsschrift für Zhkd. Band 70 Nr. 10, 1960
- 30.) Marsland E. and Shovelton D. : The effect of Cavity Preparation on the Human Dental Pulp
B. D. J. Vol 102 Nr. 6 1957
- 31.) Marsland E. and Shovelton D. : A further Investigation of the Effekt of Cavity Preparation on the human dental pulp
B. D. J. Vol 105 Nr. 1, 1958
- 32.) Meyer J. : Das Bohren mit hohen und höchsten Touren. Eine Zusammenfassung der neuesten Erkenntnisse
Inaug. -Dissertation 1960 Mediz. Akademie Düsseldorf
- 33.) Morrart G. A. und Stephens R. R. : Aident-Unit und Cavitron Gerät
Quintessenz H 9 1960
- 34.) Mühlemann H. und Rateitschak K. : Airtorpulpen
ZR 68/307 1959

- 35.) Müller O. : Pathohistologie der Zähne
Basel 1947
- 36.) Münch FC: ZM 13/430 1957
- 37.) Münch FC: Industrielle Neuerungen aus jüngster Zeit.
Deutscher Zahnärztekalendar 1960 und 1961
- 38.) Nygaard-Östby: Pulpa- und Wurzelbehandlung
DZZ H 21 1962
- 39.) Ontrup D. : Übersicht über Schleifkörper, Bohrer und Geräte zum
hoch- und höchsttourigen Bohren und Schleifen.
DZZ H 2 1960
- 40.) Peyton FA and Vaughan RC: Thermal changes developed during the cutting of tooth
tissue,
Fort. Rev. Chicago D. Soc. 20/9, 1950
- 41.) Polmann-Mooy A. : Temperaturmessungen in Zahnhartsubstanzen beim
normal-, hoch- und höchsttourigen Schleifen
DZZ H 3 1963
- 42.) Proskauer und Witt: Bildgeschichte der Zahnheilkunde
Verlag Du Mont Schauberg, Köln
- 43.) Rauber G. : Die Wirkung der Reibungswärme auf das Dentin
DZZ H 12 1962
- 44.) Strömgren H. : Die Zahnheilkunde im 18. Jahrhundert
Ein Stück Kulturgeschichte
Kopenhagen 1935
- 45.) Stüben J. und Hoppe WF: Experimentelle Untersuchungen über die Temperatur-
veränderung in der Zahnhartsubstanz beim höchsttourigen
Bohren und Schleifen
DZZ H 6 1962
- 46.) Stüben J. : Experimentelle Untersuchungen über die Wärmeleitfähigkeit
der Zahnhartsubstanzen sowie verschiedener zahn-
ärztlicher Werkstoffe
DZZ H 1 1962
- 47.) Swerdlow H. und Stanley HR: Reaction of the human dental pulp to cavity preparation
I. Effekt of water-Spray at 20 000 U/min,
J. A. D. A. 56/317 1958

- 48.) Swerdlow H. und Stanley HR: Reaction of the human dental pulp to cavity preparation II. At 150 000 U/min. with on air-water spray
J. Prosth Dent 9/121, 1959
- 49.) Swerdlow H. und Stanley HR: Reaction of the human dental pulp to cavity preparation results produced by eight different operative grinding techniques
J. A. D. A. 58/49 1959
- 50.) Schepers H. : Bohren am Zahn- und Kieferknochen, mit Tourenzahlen bis 350 000 U/min.
Inaug. -Dissertation Uni Mainz 1959
- 51.) Schwarzkopf H. und Fischer H. : Die Luftturbine in der zahnärztlichen Praxis
D. Schwarzkopf, Verlag, Hannover 19
- 52.) Viohl G. : Vibrationsschwelle am menschlichen Zahn
DZZ H 3, 1963
- 53.) Vogelsang H. : Die Reaktion der Pulpa auf plötzlichen Schmelzmangel
Deutsche Mschr. für Zhkd, H 4/97
- 54.) Walser G. : Experimentell-physikalische Untersuchungen über das Bohren und Schleifen mit turbinengetriebenen Instrumenten bei höchsten Drehzahlen
Med. Diss. Uni Mainz 1959
- 55.) Wannenmacher E. : Schmelzverlust und Pulpa
Deutsche zahnärztliche Wochenschrift 31/281 1928
- 56.) Weder M. : Über Veränderungen der Pulpa des menschlichen Zahnes nach Bearbeitung mit diamant-belegten Schleifkörpern unter Verwendung von Bohrgeräten aller Umdrehungsbe-
reiche
Inaug. -Dissertation Freie Uni Berlin 1960
- 57.) Zach Leo und Cohen G. : The biology of high speed rotary operative dental procedures
J. Dent. Res. 37/67 1958

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Priv.-Doz.
Dr. Dr. W. Ketterl für die Überlassung des
Themas und die bereitwillige Förderung mei-
ner Arbeit.

Frau Professor Dr. Dr. Schug-Kösters danke ich
für die Übernahme des Korreferats.

Auch Fräulein Kumm darf ich an dieser Stel-
le für die Herstellung der histologischen Prä-
parate meinen verbindlichen Dank sagen.

L E B E N S L A U F

Als Sohn des Zahnarztes Josef Golling und seiner Ehefrau Betty, geb. Schnitzenbaumer, wurde ich am 5. November 1936 in München geboren. Nach 5jährigem Besuch der Volksschule und 9jährigem Besuch des Ludwigsgymnasiums in München bestand ich hier am 18. Juli 1957 die Reifeprüfung. Im November des gleichen Jahres begann ich das Studium der Zahnmedizin an der Universität München, wo ich am 31. Oktober 1960 die zahnärztliche Vorprüfung und am 8. Mai 1964 das Staatsexamen jeweils mit dem Ergebnis "gut" absolvierte.

